



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

DETERMINACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN EN ACERO AISI 1018

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**  
(A R E A M E C Á N I C A)  
P R E S E N T A  
**ALFONSO ROBERTO SALAZAR VILLANUEVA**

**INGENIERO MECÁNICO**  
P R E S E N T A  
**ALFREDO AGUILAR HERRERA**



DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO

CIUDAD UNIVERSITARIA MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico este trabajo:

A mi ángel de la guarda **Eloy Salazar Villanueva**; Carnalo, de alguna manera ya dejamos huella de nuestra existencia. Te quiero, te amo, te extraño y te tengo por siempre en mi vida hasta el bendito día en que volvamos a reunirnos.

A mis Padres y Hermanos.

A todos mis amigos y familiares que ya descansan con Dios.

Agradecimientos:

Primeramente a **Dios** por darme la vida y la oportunidad de llegar hasta aquí. A San Judas Tadeo, santo de mi devoción y a quien le debo muchos milagros, gracias

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería, al Departamento de Ingeniería Mecánica y a mis Profesores por brindarme sus enseñanzas y la oportunidad de cumplir esta meta.

A los académicos e investigadores de la Facultad de Ingeniería, en especial al Dr. José Javier Cervantes Cabello, Doctor no me cansaré de agradecer todo lo que ha hecho por mí. Al Dr. Arturo Barba, M.I. Magdalena Trujillo, M.A. Jesús Rovirosa, y al M.I. Eduardo Garduño, por su apoyo y por sus comentarios sobre esta tesis, la experiencia y conocimiento de todos son invaluableles.

A mi madre, eres una persona excepcional, parte y orgullo total de mi vida, gracias por tus desvelos, preocupaciones y por darme parte de tu ser.

A mi padre, gracias por todo, eres parte importante en mi vida.

A mi hermana Yolis, Gracias por estar cuando te he necesitado, gracias por tu amor y porque sé que te sientes orgullosa de mí.

A mi hermana Sari, tu apoyo y cariño han sido esenciales en mi formación y en vida entera.

A Raymundo, mi hermano, jefe, compadre, padrino, capitán, tutor, cuasi-padre,...a mi ejemplo. Chivito, eres mi inspiración y pilar de mi vida, gracias por todo tu apoyo, cariño y por tu convencimiento de que yo podía hacer algo bueno con mi destino.

A mi esposa Erika, muñeca sin Tí nada de esto sería posible, gracias por tu apoyo, por tu confianza, por tu sacrificio, por tu amor, porque le has dado a mi vida lo que le faltaba, te amo.

A mi hija Erika M, chiquita eres el motor de mi vida, lo que me impulsa a luchar, eres la bendición que Dios me dió para agradecerle eternamente que nací, gracias a Tí vivo y soy lo que soy. Te amo chaparrita, gracias por todo tu amor.

A mis sobrinos, Denny, Kevin, Janet, Itzel, Ray, Alejandro, Zuly, Isa, Andrea, Grecia, Karime, Uriel, LuisaFer, por exigirme en silencio como parte de sus ejemplos, son mi orgullo y a todos los llevo en mi corazón.

A mi cuñado Frank, gracias por todo, eres de lo mejor.

A mi cuñada Lety, a mi compa Javi y Familia., a Miguel, a todos mis demás cuñados, suegros, sobrinos, primos, tíos, ahijados, compadres, compañeros y amigos. A los cuates y sus familias. Gracias por su apoyo y por ser parte de mi existencia. Cunini, gracias por enseñarme tu oficio.

A mi socio y amigo Alfredo Aguilar, gracias por darme la oportunidad de trabajar contigo y de hacer de este sueño una realidad, el destino nos juntó para dejar una historia con esta tesis. La admiración es mutua y de todo corazón te deseo mucho éxito, gracias por todo.

Al C.P. Carlos Hernández y su esposa C.P. Magdalena Ramos, gracias por todo y por aguantarme tantas veces.

A mi jefe del Gea. Sr. Francisco García M., gracias por su apoyo.

Alfonso Roberto Salazar Villanueva.

## Agradecimientos:

A mi padre Fermín:

Este trabajo es el fruto de todos tus esfuerzos, sacrificios, esperanzas y deseos por llegar a convertirme en un hombre de bien. ¡Gracias por todo tu apoyo!

A mi madre Clara:

Por todo tu amor, comprensión, cariño, confianza, por todos tus esfuerzos, y por apoyarme en todos estos años para continuar en esta larga pero grandiosa travesía que es la Ingeniería Mecánica.

A mi hermano Oscar:

Por los consejos, el cariño, toda la diversión acumulada y tu amistad, ya que siempre estuviste en todo momento para apoyarme en todos los aspectos y motivarme a seguir adelante.

A mi hermana Sacnite:

Por tu cariño, apoyo, por las risas y tú forma de ser tan afectiva y efusiva. ¡El camino no es fácil, sin embargo, con tu fuerza e inteligencia llegarás a ser la mejor en esta extraordinaria carrera!

A mi amigo y colega de tesis Alfonso Salazar:

Después de tanto tiempo al fin lo conseguimos, muy a pesar de todos los inconvenientes, obstáculos y accidentes suscitados. ¡Admiro tu fuerza, valentía y destreza que demostraste en todo este tiempo, gracias por todo lo que haz hecho por mi y por seguir en esta odisea conmigo!

A mi amigo Rafael Valencia:

Por toda la ayuda que me proporcionaste a lo largo de la carrera, gracias por tu amistad de todos estos años y espero que en algún momento de la vida nos lleguemos a reunir de nuevo “mi viejo amigo”.

A Lacrimosa:

Por acompañarme todos estos años con tu perfecta y suprema armonía.

A todos aquellos que he omitido y que fueron parte importante con su participación en este trabajo (no por descortesía sino por falta de espacio).

Agradezco en primer lugar y de forma muy especial al Dr. José Javier Cervantes Cabello, por todo su apoyo, consejos, recomendaciones, asesorías, tiempo dedicado y sobre todo su amistad.

A mis sinodales por su valioso tiempo, sus comentarios y aportaciones:

Dr. José Javier Cervantes Cabello

Dr. Arturo Barba Pingarrón

M. A. Jesús Roviroza López

M. I. Magdalena Trujillo Barragán

M. I. Eduardo Garduño

A todos mis maestros de la división de Ingeniería Mecánica, a la división de Ciencias Básicas y a la Universidad Nacional Autónoma de México por todos los valiosos conocimientos que he recibido.

Alfredo Aguilar Herrera.

# **DETERMINACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN EN ACERO AISI 1018**

## **OBJETIVOS:**

- 1) Recopilar la documentación actualizada relativa al proceso de electroerosión (EDM).
- 2) Efectuar la caracterización del proceso de electroerosión por penetración aplicado al maquinado de acero AISI 1018

# ÍNDICE

<b>Nomenclatura.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPITULO 1. ANTECEDENTES DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Historia.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Definición del proceso.....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Ventajas.....	20
1.2.2 Desventajas.....	21
<b>1.3 Clasificación de los procesos de Electroerosión.....</b>	<b>21</b>
1.3.1 Proceso de Electroerosión por penetración.....	21
1.3.2 Electroerosión por hilo.....	25
1.3.3 Taladrado por EDM.....	28
1.3.4 Corte con alambre por electrodescarga (EDWC).....	29
1.3.5 Electropulido.....	30
<b>1.4 Mecanismos de generación del proceso de Electroerosión.....</b>	<b>31</b>
1.4.1 Máquina para el proceso de Electroerosión.....	31
1.4.2 El electrodo.....	32
1.4.3 Portaelectrodo.....	34
1.4.4 Fluido dieléctrico.....	38
1.4.5 Mecanismo de material removido.....	40
1.4.6 Relaciones de Lazarenko en circuito RC.....	43
<b>1.5. Controles para la generación de pulsos de descarga.....</b>	<b>45</b>
1.5.1 Circuitos generadores de pulsos.....	45
1.5.2 Circuito Resistencia-Capacitancia (RC).....	45

1.5.3 Circuito de pulso transistorizado.....	48
1.5.4 Desarrollo de los generadores de pulso controlado.....	52
1.5.5 Circuitos de fuente de poder.....	55
<b>1.6 Tendencias a futuro.....</b>	<b>63</b>
1.6.1 Máquinas.....	63
1.6.2 Dieléctricos.....	65
1.6.3 Materiales para electrodos e hilos.....	65
1.6.4 Usos.....	66
1.6.5 Electrodos.....	67
1.6.6 Avances recientes en EDM como un proceso de acabado superficial.....	68
<b>CAPITULO 2. ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN.....</b>	<b>71</b>
<b>2.1 Componentes de la máquina Agie Engemaq EDM 440 NC.....</b>	<b>73</b>
2.1.1 Panel de control.....	73
2.1.2 Llaves selectoras del S-BOX.....	74
2.1.3 Sistema de sujeción del portaelectrodo.....	75
2.1.4 Sistema de sujeción de la pieza de trabajo.....	76
2.1.5 Bandeja de trabajo.....	76
2.1.6 Detectores de temperatura y nivel dieléctrico.....	77
2.1.7 Sistema anticollisión del electrodo.....	78
2.1.8 Bomba del dieléctrico.....	78
2.1.9 Mesa de coordenadas y sistema de freno.....	79

2.1.10 Llave selectora de polaridad.....	80
2.1.11 Llave pulsadora de emergencia.....	80
2.1.12 Voltímetro y Amperímetro.....	81
2.1.13 Control de regulación del gap y control de regulación de la sensibilidad del servo.....	81
2.1.14 Diodos de señalización de la fuente de erosión.....	82
2.1.15 Teclado.....	83
2.1.16 Diodos para la señalización del panel del generador.....	84
2.1.17 Portaelectrodo.....	85
2.1.18 El sistema de movimiento del electrodo.....	86
2.1.19 Alineación de la pieza de trabajo y el electrodo.....	87
<b>2.2 Fluido dieléctrico.....</b>	<b>87</b>
2.2.1 Características del dieléctrico.....	88
2.2.2 Combustión del dieléctrico.....	89
<b>2.3 Materiales para electrodos utilizados en las pruebas.....</b>	<b>89</b>
<b>2.4 Materiales de proceso.....</b>	<b>90</b>
<b>CAPITULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>92</b>
<b>3.1 Procedimiento experimental.....</b>	<b>93</b>
<b>3.2 Parámetros de entrada.....</b>	<b>94</b>
<b>3.3 Resultados experimentales.....</b>	<b>96</b>
3.3.1 Tiempo de mecanizado y longitud desgastada del electrodo.....	96
3.3.2 Diámetro de la superficie electroerosionada.....	100
3.3.3 Rugosidad.....	102

3.3.4 Dureza.....	107
3.3.5 Macroscopía.....	114
<b>CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>120</b>
<b>4.1 Análisis de los resultados en grafica.....</b>	<b>121</b>
<b>4.2 Macroscopía de las piezas trabajadas.....</b>	<b>130</b>
<b>4.3 Microscopía de las superficies.....</b>	<b>134</b>
<b>4.4 Análisis de dureza.....</b>	<b>136</b>
4.4.1 Microdureza.....	136
4.4.2 Dureza Rockwell.....	139
<b>4.5 optimización del proceso de electroerosión.....</b>	<b>139</b>
4.5.1 Resultados de la prueba con Grafito.....	140
4.5.2 Resultados de la prueba con Cobre electrolítico.....	141
4.5.3 Análisis de las muestras.....	142
4.5.4 Conclusiones para la prueba 6-2.....	143
4.5.5 Análisis general de los electrodos para trabajos con EDM.....	144
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....</b>	<b>145</b>
<b>5.1 conclusiones.....</b>	<b>145</b>
<b>5.2 Conclusiones del uso del proceso de EDM.....</b>	<b>148</b>
<b>5.3 Conclusiones del uso del proceso de EDM .....</b>	<b>148</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>150</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>151</b>
<b>Índice de gráficas.....</b>	<b>156</b>

<b>Índice de tablas.....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO 1. Artículo presentado en el XII congreso de la SOMIM.....</b>	<b>158</b>
<b>ANEXO 2. Práctica para el Laboratorio de Manufactura.....</b>	<b>168</b>

# NOMENCLATURA

I = Corriente de descarga, Amp

V = Voltaje de descarga, V

T = Tiempo de mecanizado, min

TON = Tiempo de duración de la descarga, Duración del pulso,  $\mu$ s

TS = Transistor que establece el nivel de corriente de descarga, TS

TOFF = Pausa entre dos descargas consecutivas, %

Vw = Arranque de material,  $\text{mm}^3/\text{min}$

L<sub>INICIAL</sub> = Longitud inicial del electrodo, mm

L<sub>FINAL</sub> = longitud final del electrodo, mm

DT = Duración de la pausa, %

D<sub>EXTERIOR</sub> = Dimensión del diámetro exterior de la cavidad erosionada, mm

D<sub>INTERIOR</sub> = Dimensión del diámetro interior de la cavidad erosionada, mm

Ra = Rugosidad de la superficie erosionada,  $\mu\text{m}$

HV = Dureza Vickers,  $\text{kg}/\text{mm}^2$

HRC = Dureza Rockwell C,  $\text{kg}/\text{mm}^2$

# **CAPITULO 1.**

## **ANTECEDENTES DEL PROCESO DE ELECTROEROSION**

### **1.1 HISTORIA**

La erosión de metal a través de la descarga por chispa (EDM), fue observada por vez primera por el científico inglés Sir Joseph Priestley en 1768. Transcurrieron cientos de años después para darle un uso práctico, la descarga por chispa se utilizó cada vez más para la desintegración de varios metales producidos en soluciones coloidales.

Los dos principales tipos de procesos EDM (Electrical Discharge Machining) son el de penetración y el de alambre. El proceso por penetración fue redefinido cerca de los años 1940 con la llegada del generador de pulsos, planetario y técnicas de movimiento orbital, CNC (Control numérico Computacional) y el mecanismo de control.

Desde los tubos de vacío a los transistores de estado sólido del presente, no solamente fue posible llegar al Control de pulsos en tiempo sino que además se controló los llamados tiempos muertos del proceso haciendo que el circuito del proceso EDM sea mejor, preciso, digno de confianza y así el proceso EDM en la industria comienza su crecimiento. Las primeras máquinas de EDM emplearon circuitos de resistencia-capacitancia (RC) o circuito de relajación, donde la energía se acumula en un capacitor y se descarga rápidamente a través de un pequeño espacio.

La historia del proceso EDM data de los días de la primera y segunda guerra mundial pero muy pocos fueron los realmente beneficiados de este proceso y la popularidad de esta tecnología fue escasa. El material fue removido con electrodos de la pieza de trabajo, lo cual es controlado por un arco de chispa. Durante este tiempo la vibración entró en el proceso, esto representaría el primer intento por controlar el espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo (gap). La vibración del electrodo permitió que la remoción del material fuera más eficiente.

Dos científicos soviéticos estaban convencidos de que se podrían hacer muchas mas mejoras al proceso. Los doctores B.R. y N.I. Lazarenko, inventan un simple servo controlador el cual ayudaría a mantener el ancho del gap entre la herramienta y la pieza de trabajo. Esto reduce el arco de descarga y hace que el maquinado por EDM tenga un mayor beneficio.

El nacimiento de la electroerosión se produce en Moscú, durante el transcurso de la II guerra mundial, cuando los físicos rusos B.R. y N.I. Lazarenko publicaron su estudio "Inversión del efecto de desgaste de las descargas eléctricas", en conjunto con el Dr. Boris N. Zolotykh el 23 de abril de 1943. Este primer estudio es el punto de origen de la electroerosión: la aplicación, en tecnología de fabricación, del efecto de arranque de metal mediante descargas eléctricas con una distribución controlada.

En 1943 el matrimonio Ruso B. R. y N. I. Lazarenko, investigan el desgaste de interruptores al entrar en contacto, deducen que las descargas de la chispa se podrían utilizar para trabajar los metales nuevos recientemente desarrollados, los cuales demostraban ser difíciles de trabajar por métodos establecidos.

Los doctores Lazarenko del Instituto Técnico de Moscú tuvieron la idea de explotar el efecto erosivo de las descargas eléctricas y desarrollar un nuevo método de arranque de viruta sin contacto entre la pieza y la herramienta, llamado electroerosión. Ellos fueron los primeros en crear un generador, por medio de un circuito eléctrico muy sencillo. Por ello este primer generador lleva el nombre de "Circuito de Lazarenko", posteriormente fue llamado Generador de Relajación.

El circuito de relajación tipo RC proporcionó el primer sistema de control fiable de los tiempos de los pulsos, además de un sencillo servo controlador que ayudaba a mantener constante la distancia del gap entre la herramienta y la pieza a mecanizar. Lo anterior fue crucial en la historia de la electroerosión, ya que hizo que se redujeran las situaciones de cortocircuito y que el proceso se volviera más rentable económicamente.

El profesor Boris N. Zolotykh se unió a los Lazarenko en aquellos difíciles años y fue el encargado de profundizar en la investigación de la electroerosión y de promover su introducción a las aplicaciones prácticas. Zolotykh, Lazarenko y su mujer prosiguieron el desarrollo durante toda su vida. El estado soviético promovió su desarrollo y en poco tiempo, se crearon distintos equipos e institutos específicos para este campo, además del instituto de los Lazarenko, que era básicamente un instituto de investigación en física. Entre los más importantes en Rusia destacan:

- El **MIEM Moskovskii**, Instituto para las Máquinas y la Electrónica, donde Zolotykh prosiguió su trabajo.
- El Instituto de Máquina Herramienta **ENIMS** (Experimentalnaja Nauk Institut Mechanisacy Stankov - Naukinautsch Institut Mekanizatzie).
- Y, para la industria de maquinaria pesada de Leningrado - turbinas y máquinas Diesel para embarcaciones - que estaba situada en una zona de fabricantes de máquinas-herramienta, se creó un instituto cuyas siglas eran **SPKTBO**.

Tras la guerra mundial, otras naciones comenzaron a pensar sobre esta idea. En los países del Este, destacó Albinski en Cracovia (Polonia). También el Dr. Stanjek, en una compañía denominada **VUMA**, en Eslovaquia. Por su sólida economía los países vencedores de la guerra desarrollaron empresas, destacando principalmente **Elox**, que acuñó el término "*Elox-despark*", en lugar de electroerosión (*to elox a workpiece*), con un intento de dar fama a su nombre. La empresa se denominó más tarde "**Method X**". La tercera en entrar en este campo fue **First Sterling**, que después pasó a denominarse **Sparcatron**.

Del primer grupo que destacó en Inglaterra. Messr. Rudorff and Fefer comenzaron sus desarrollos posiblemente un poco antes que los demás y lo manifestaron al exponerlo por primera vez en la Feria Europea de la Máquina-Herramienta de Milán, en 1954. En aquel momento también aparecieron dos empresas suizas: **Agie** y **Charmilles**, con su primer intento de unidad de mecanizado por electroerosión. Actualmente, **Sparcatron** ya no existe. **Charmilles** y **Agie** están en proceso de fusión.

Los alemanes crearon dos empresas, que fueron de hecho dos pares de empresas: **Nassovia** con **Krupp** y **AEG-Elotherm** con **DEW Krefeld**. Desarrollando y construyendo una máquina de descarga eléctrica (electroerosión) dando inicio a la comercialización de dos máquinas alemanas. Aparecieron otras marcas también en Inglaterra, como **Wickman** en colaboración con Wickman and **Languepin**, así como **Qualitex** en Francia. En España arrancó **Ona Durango**. El mundo industrial no se interesó por la electroerosión hasta 1950, época en que aparecen las primeras máquinas que son utilizadas únicamente para la extracción de brocas y machos rotos en el interior de las piezas, es decir para operaciones adicionales a las realizadas por procedimientos convencionales que tenían poca importancia.

En 1955 aparecen las primeras máquinas de electroerosión creadas para el mecanizado por penetración, iniciando así la aplicación industrial de las investigaciones, años más tarde apoyándose en el control numérico, se desarrolla la electroerosión por hilo.

En 1960 en Praga tuvo lugar la primera conferencia del ISEM fundado principalmente por Stanjek director de la empresa checa VUMA que con el objetivo de mantener a su plantilla informada, ingresó en la *Dom Techniky* (Casa de la Técnica) de la asociación de Ingenieros. La segunda fue en 1966 en Brno, esta conferencia fue la primera en la que Bernd M. Schumacher participó y donde acudieron Zolotykh, los Lazarenkos y Stanjek. En ese evento, las empresas occidentales invitaron a las orientales durante una velada y donde se gestó la idea de tener un ISEM de forma regular como una conferencia internacional. Asumiendo el compromiso principalmente, el Dr. Ullmann, fundador de **Agie** y el Dr. Pfau, de **Charmilles**, quien le dió soporte para patrocinarlo y para convertirlo en una organización internacional. Ahí fueron mostrados problemas cuando el modelado matemático del proceso EDM fue realizado. La contaminación del gap, el comportamiento hidrodinámico y termodinámico del fluido de trabajo eran difíciles para el modelo. Obtener resultados de un modelo para todas las prácticas tecnológicas resultaba difícil. Esta inhabilidad se prolongó con la alta demanda del mercado en lo referente a la aplicación orientada a la investigación en los procesos EDM.

Los transistores planos aparecieron alrededor de 1958 provocando una evolución espectacular de la electroerosión para la siguiente década, cuando se desarrollan las primeras máquinas equipadas con generadores de impulsos totalmente transistorizados. Esto se debió a que este tipo de generadores ofrecía grandes ventajas con respecto a los de relajación, tales como, una mayor velocidad de mecanizado, un menor desgaste volumétrico del electrodo y una mayor uniformidad en la rugosidad de acabado en las piezas mecanizadas por este procedimiento. La electroerosión pasa a ser una tecnología más eficaz y competitiva, con aplicaciones más diversas y con ello cada vez mayor la demanda de máquinas de electroerosión.

La electroerosión por hilo servocontrolada por control numérico fue desarrollada hacia el año 1969 por un equipo formado por el Dr. Bernd M. Shumacher. La evolución más importante que experimentó el proceso de electroerosión mediante corte por hilo en los años 70 fue debida a la aparición de generadores de poder para corte con mejores prestaciones de potencia, mecánicas y de automatización de las máquinas, nuevos electrodos de hilo, así como una mejora también de los procedimientos de limpieza del gap.

En 1974 se presentó en la feria BIMU de Milán la primera máquina de electroerosión por penetración equipada con un sistema de filtrado de dieléctrico que garantiza 10.000 horas de trabajo sin ningún costo de mantenimiento. En 1978 las máquinas de electroerosión por hilo sufren una variante al cambiar su estructura a cuatro ejes y en 1985 se les aplica sistemas enhebradores automáticos.

Al pasar los años la velocidad del proceso aumento hasta en 20 veces, el acabado superficial fue mejorado por un factor de 15, mientras que el lapso que duraba la descarga fue de una duración de 10 veces más. En la FIGURA 1 se muestra un breve resumen de la evolución de la electroerosión a través del tiempo.

En 1981 la empresa ONA (Empresa que a finales de 1954 consigue la patente para el desarrollo de la tecnología de electroerosión), presenta en la feria mundial de máquina-herramienta (EMO), el primer control numérico del mundo concebido exclusivamente para el mecanizado de electroerosión por penetración llamado CNC POLISPARK, esta empresa lanza al mercado en la feria mundial de Hannover de 1985 una nueva gama de máquinas de electroerosión por penetración "tipo puente", con capacidad de carga en el cabezal de electrodos de hasta 3000 kg de peso y piezas en la mesa de hasta 15000kg para cubrir la necesidad de fabricar moldes cada vez de mayores dimensiones.

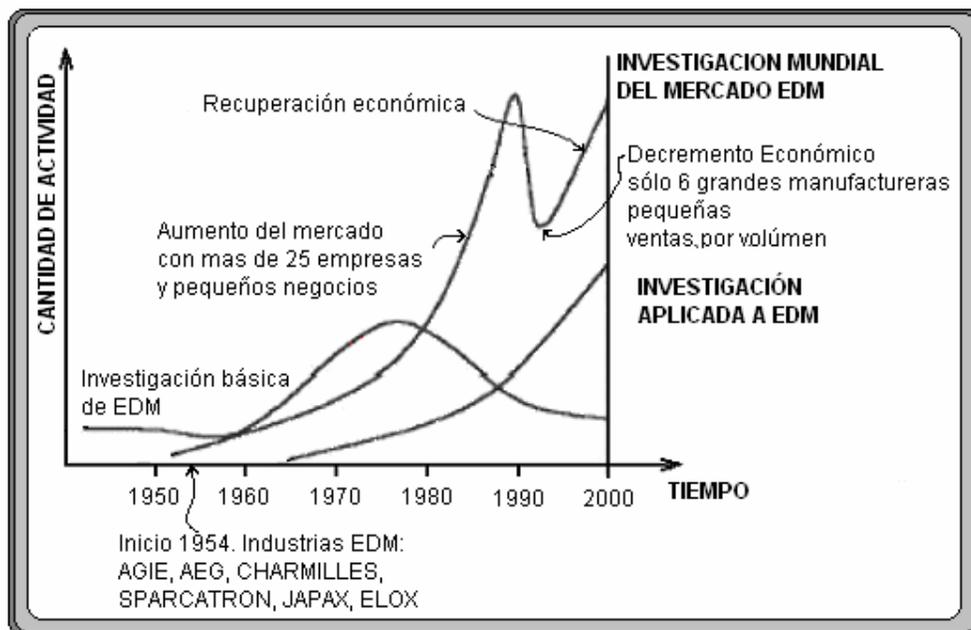


FIGURA 1. Actividad de la EDM con el paso del tiempo

## 1.2. DEFINICION DEL PROCESO

El proceso de electroerosión por penetración (Electrical Discharge Machining) consiste en aplicar por medio de una chispa, calor termoeléctrico concentrado para arrancar el material metálico a través de un espacio entre el electrodo y la pieza de trabajo (Gap), que comúnmente están sumergidos en un fluido dieléctrico, tal y como lo muestra esquemáticamente la FIGURA 2. Las chispas ocurren en secuencia y son repetidas miles de veces en cada segundo. Cada chispa definida como TON (tiempo de descarga) es seguida por una pausa definida (TOFF).

La duración del tiempo de descarga y tiempo de pausa es ajustable y precisa al ser ajustado por el operador de la máquina de acuerdo con el trabajo de mecanizado. La secuencia ON/OFF representa un ciclo de EDM.

El maquinado por electrodescarga es un proceso para producir huecos, formas externas, perfiles o cavidades en una pieza de trabajo eléctricamente conductora, mediante la aplicación controlada de descargas eléctricas de alta frecuencia para vaporizar o fundir el material de la pieza de trabajo en un lugar específico. Las descargas eléctricas son resultado de pulsos controlados de corriente directa y ocurren entre el electrodo-herramienta (generalmente negativo) y el material eléctricamente conductor de la pieza de trabajo (generalmente positivo).

Entre la herramienta y la pieza de trabajo hay una pequeña distancia entre 0.01 a 0.5mm, y se sumerge en un líquido dieléctrico, por ejemplo parafina, alcohol blanco o aceite ligero. Para iniciar una descarga se aplica un voltaje de ruptura en la pequeña abertura (determinado por la distancia de la abertura y la resistencia aislante del dieléctrico). Se ioniza un canal en los dos puntos más cercanos entre el electrodo y la pieza de trabajo, se produce un gran flujo de corriente que erosiona una partícula de metal. El canal ionizado se forma de un plasma, es decir, gas ionizado a muy alta temperatura, alrededor de 8000 a 20000°C, constituido por átomos metálicos (M) vaporizados de la pieza de trabajo y el electrodo herramienta, iones positivos (M+) y electrones (e-), como se muestra en la figura 2 en el detalle.

La vaporización instantánea produce una burbuja de alta presión que se expande radialmente en el dieléctrico. Al interrumpirse la descarga, el metal es expulsado y deja un pequeño cráter esférico en la pieza de trabajo y se vuelve a solidificar como glóbulos en suspensión en el dieléctrico. En la pequeña distancia (Gap) entre el electrodo y la pieza de trabajo se produce un lodo de partículas negras, principalmente de carbono, formado por los hidrocarburos del dieléctrico y es expulsado por la energía de la descarga, permaneciendo en suspensión hasta que se elimina por filtración. Inmediatamente después de la descarga, el dieléctrico que rodea al canal se desioniza y una vez más queda listo para funcionar como elemento aislante.

La rapidez de remoción de metal de la herramienta y la pieza de trabajo es asimétrica, y depende de la polaridad, conductividad térmica y punto de fusión de los materiales, así como de la duración e intensidad de las descargas. Mediante una adecuada selección de parámetros, la rapidez de erosión de la pieza de trabajo se puede aumentar mientras que la

de la herramienta se reduce. Como el metal se elimina por vaporización, las propiedades físicas de la pieza de trabajo, que son importantes en el corte de metales, por ejemplo la dureza y la tenacidad, no son significativas, y los metales duros que no se puede mecanizar por métodos tradicionales, como son los carburos de tungsteno, se pueden erosionar.

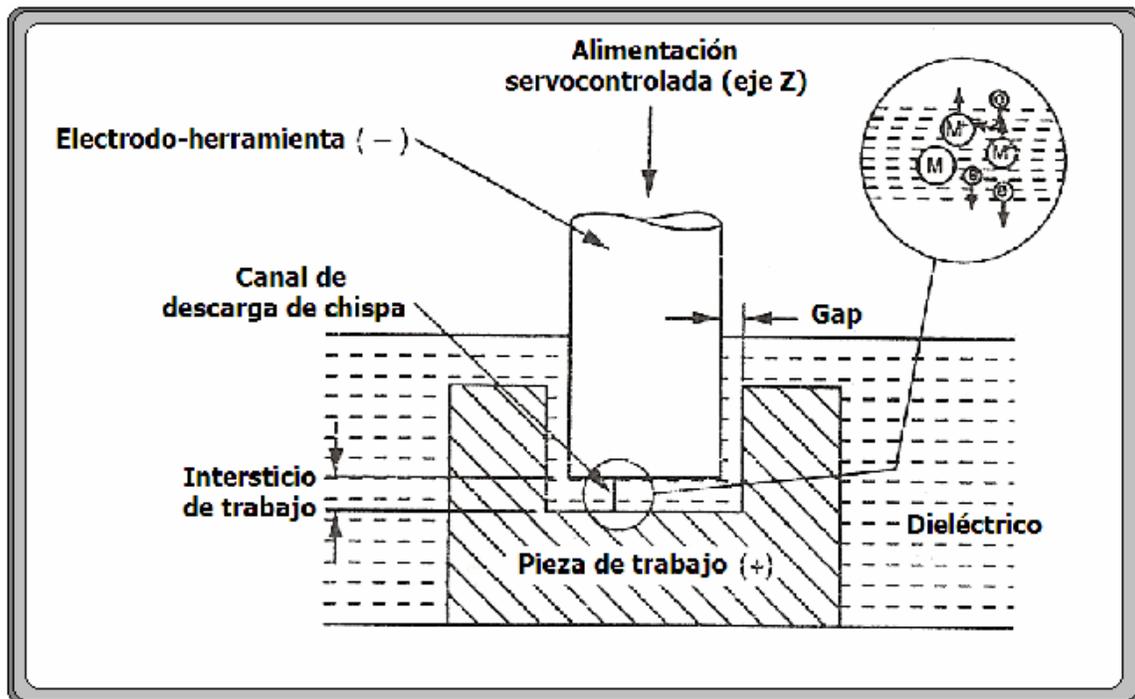


FIGURA 2. Principio básico de maquinado por electroerosión (EDM)

La electroerosión es excelente para mecanizar materiales templados. Cualquier material metálico (conductor) puede ser mecanizado sin limitación práctica en la geometría o detalles. Esta capacidad permite el mecanizado de metales en condición de máxima dureza. A través del proceso de electroerosión por penetración, el mecanizado sin contacto hace posible crear piezas con paredes delgadas. Cualquier forma geométrica que se puede alcanzar con un electrodo puede ser mecanizado con electroerosión.

En el proceso de mecanizado el arranque de material se produce por fenómeno térmico, tal y como lo muestra la FIGURA 3. Temperaturas extremadamente altas ocurren durante la fase de descargas.

La alta temperatura influye en la cristalografía del material erosionado (pieza de trabajo). Estas influencias pueden ser serias o irrelevantes de acuerdo con el material en uso en el proceso y la rugosidad del acabado de la superficie erosionada. Algunos de los materiales presentan alteraciones definitivas en la estructura.

Al desaparecer el aislamiento del dieléctrico, salta la chispa, incrementándose la temperatura hasta los 20000°C, vaporizándose una pequeña cantidad de material de la pieza y el electrodo formando una burbuja que hace de puente entre ambas.

Al anularse el pulso de la fuente eléctrica, el puente se rompe separando las partículas del metal en forma gaseosa de la superficie original. Estos residuos, se solidifican al contacto con el dieléctrico y son finalmente arrastrados por la corriente junto con las partículas del electrodo. El ciclo completo se repite del orden de miles de veces por segundo.

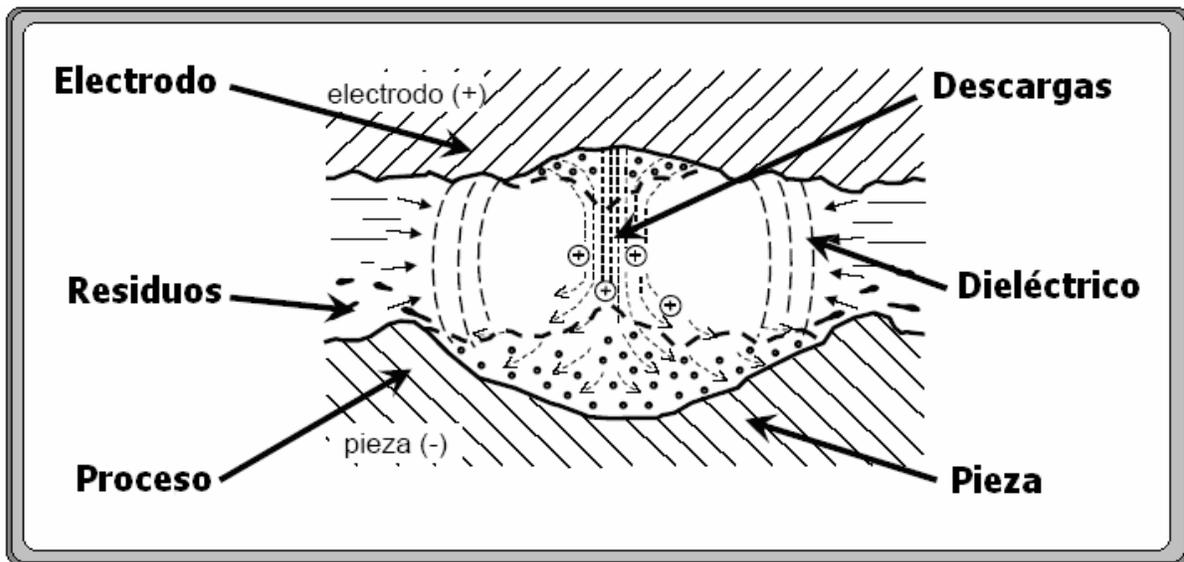


FIGURA 3. Elementos del proceso de Electroerosión

Los procesos de fabricación que se basan en la utilización de la fuerza para realizar agujeros en chapa de menos de 3 mm, como puede ser un punzonado en prensa, distorsionan o alteran generalmente el material y dejan rebabas que deben ser eliminadas con algún otro método posterior, si la chapa es muy fina, se puede producir una deformación plástica en las proximidades del agujero. Esta situación no se presenta con la electroerosión. La técnica permite hacer pequeños agujeros en rejillas, tubos de paredes muy finas y estructuras frágiles. Los bordes de un agujero realizado con electroerosión están libres de rebabas y el mecanizado no produce ninguna deformación en el material.

Normalmente es difícil el mecanizado de piezas con componentes de distinta dureza, tal es el caso de un pequeño taladro convencional sobre una pieza de un material compuesto, en el que la broca se desviará hacia el material más blando. Esta situación no se da en electroerosión ya que las velocidades de erosión no dependen de la dureza del material. Se pueden realizar sin problema taladrados con relación profundidad/diámetro de 20/1, mientras que con taladrados convencionales este límite está en 10/1 relación en la cual la broca corre el riesgo de desviarse y producir un agujero fuera de tolerancias.

## 1.2.1 Ventajas

El proceso de electroerosión, a primera vista, puede parecer un método muy lento para arrancar material, incluso si pensamos que el proceso descrito tiene lugar cientos de veces por segundo. Sin embargo, se puede demostrar que es una técnica mucho más rápida y presenta ventajas frente a otras. La técnica permite la obtención de piezas con formas de simetría compleja, tanto externa como internamente. Permite trabajar con materiales frágiles o fácilmente deformables que no pueden ser mecanizados con otros métodos.

La técnica es independiente de la dureza del material de trabajo, lo que representa una gran ventaja en el trabajo con materiales muy duros como los utilizados en la fabricación de matrices y también en el caso de tener que trabajar con mezclas de materiales de distinta dureza.

El proceso de electroerosión remueve material casi tan rápido como el esmerilado con carburos cementados, y aún más rápido que el esmerilado en algunos materiales de uso en aeronáutica. Al no generarse fuerzas de corte como en los procesos de mecanizado (torneado, taladrado, etc.) resulta aplicable para materiales frágiles. Permite cortar materiales duros, formas internas, formas difíciles de generar, cavidades y piezas delicadas.

Se pueden taladrar agujeros muy inclinados en superficies curvas sin problemas de deslizamiento. Así como de elevada relación de aspecto (cociente entre la longitud y el diámetro), es decir, con pequeño diámetro y gran profundidad imposibles con un taladro convencional.

Al ser un proceso esencialmente térmico, se puede trabajar cualquier material mientras sea conductor, sin embargo, el mecanizado tradicional presenta serias dificultades con materiales y aleaciones muy duras. Las tolerancias que se pueden obtener son muy ajustadas, desde  $\pm 0,025$  hasta  $\pm 0,127$  mm. En resumen, podemos citar las siguientes ventajas para el proceso:

1. No hay desviación de medidas
2. Ausencia de esfuerzos de mecanizado
3. Fácil mecanizado de materiales duros
4. Mecanizado fácil de orificios cuadrados
5. La cantidad de maquinado es independiente de la dureza de los componentes
6. Las formas complejas pueden maquinarse con una gran exactitud
7. Es una técnica fácilmente automatizable con programas - piezas y posibilita el encadenamiento de las operaciones, desde el desbaste al acabado, incluidos los desplazamientos y los cambios de herramientas.

El sistema de control puede gobernar los movimientos de un robot que realiza la carga de las piezas desde un contenedor o cargador y depositarlas en otro diferente después del mecanizado. Esto permite independizar el proceso de cualquier intervención humana, permitiendo mecanizados nocturnos o de fin de semana. Es una práctica bastante habitual en la industria poner a última hora del día la pieza en la máquina y volver a la mañana siguiente a recoger la pieza terminada.

## 1.2.2 Desventajas

Este proceso es más lento, desde el punto de vista de la remoción de metal, si se compara con los procesos de maquinado común que implican contacto directo con la cuchilla. Tras el proceso, suele quedar una capa superficial de metal fundido, frágil y de extremada dureza que debe eliminarse en aquellas piezas que requieran resistencia a la fatiga.

Generalmente se emplean electrodos de grafito, por tener una elevada temperatura de vaporización es más resistente al desgaste. No obstante, este material es frágil, por lo que la manipulación de los electrodos debe ser muy cuidadosa.

Otras desventajas que podemos citar son:

- La pieza debe conducir la electricidad.
- No es posible obtener ángulos absolutamente vivos.
- La electroerosión de fundición puede crear problemas en presencia de inclusiones de tierra.

## 1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE ELECTRO-EROSION

Los procesos de electroerosión más significativos en la industria y que se mencionarán en este trabajo son:

- Electroerosión por penetración
- Electroerosión de hilo
- Taladrado por EDM
- Corte con alambre por electrodescarga (EDWC)
- Electropulido

### 1.3.1 Proceso de Electroerosión por penetración.

Es un proceso de remoción de material el cual utiliza descargas eléctricas controladas, las descargas aplican energía evaporando el metal de la pieza de trabajo de cierta área para luego ser solidificada en forma de pequeñas partículas por efecto enfriador de fluido dieléctrico, el cual está presente entre el electrodo y la pieza de trabajo (Gap), todo esto revela que las pequeñas partículas son arrojadas fuera del área de trabajo repitiéndose el proceso miles de veces. La pieza de trabajo debe ser conductora de la corriente eléctrica, se conecta a un polo de un generador de corriente. El electrodo, realizado con material también conductor, se conecta al otro polo del generador. Las dos partes, que están separadas por una pequeña distancia, están inmersas en un fluido dieléctrico con el fin de controlar la resistencia a la descarga eléctrica en esa zona intermedia. Al aplicar un incremento del voltaje en los electrodos se consigue un aumento del desorden interno en el fluido comprendido entre los electrodos hasta que termina siendo ionizado de forma que esta zona intermedia, que en condiciones normales no era conductora, pasa a serlo, permitiendo el flujo de corriente de un electrodo a otro en forma de descarga de chispas.

El canal a través del cual se transmite la descarga tiene una sección tan pequeña que se consigue una alta densidad de corriente, del orden de 104 a 106 amperios / cm<sup>2</sup>. Como consecuencia, la temperatura en el canal oscila entre 5000 y 10000 ° C, dando como resultado una fusión y vaporización de pequeñas cantidades de material, de ambas superficies, electrodo y pieza de trabajo, en los puntos en los que se produce la descarga. La liberación de gas producida en la vaporización origina una burbuja de gas dieléctrico en torno al canal de descarga. Cuando termina el pulso eléctrico se paran inmediatamente tanto las chispas como el calentamiento. Como consecuencia, el canal de descarga y la bolsa de gas desaparecen, se diluyen.

La irrupción del fluido dieléctrico frío en el lugar que antes ocupaba la burbuja consigue solidificar bruscamente el material fundido tanto de la herramienta como de la pieza de trabajo y es expulsado violentamente. Se produce un pequeño "cráter" en la superficie de los dos y una pequeña esfera de material solidificado que es extraída de la zona por el fluido dieléctrico.

La secuencia descrita puede llegar a repetirse varios cientos de miles de veces por segundo. Cada descarga se produce en el punto que está a la mínima distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo. La erosión en la pieza de trabajo, y en menor extensión también en la herramienta, hace que aumente paulatinamente la distancia entre ambos. Las sucesivas descargas a través de toda la superficie del electrodo siempre se producen en los puntos situados a la menor distancia. De esta manera, la superficie de la pieza de trabajo va adquiriendo la forma que tenga el electrodo. A medida que el proceso continúa y el electrodo va avanzando automáticamente para mantener constante la distancia con la pieza de trabajo, se genera la cavidad o el corte como una réplica del electrodo.

Cualquier material derretido no expulsado durante el proceso de resolidificación forma una película dura en la superficie de trabajo. Los esfuerzos térmicos, deformación plástica y el encogimiento se traducen o dan como resultado esfuerzos residuales y finos **“cracks” (grietas)** que se pueden formar debajo de los límites de grano.

Directamente debajo de la película dura (o cubierta) está una zona afectada por el calor, la cual en caso de tratamiento térmico se comporta comúnmente como el material original. Con las apropiadas condiciones de operación como son el bajo amperaje, alta frecuencia y un valor resultante bajo de material removido, la profundidad de esta película dura (o grosor) puede ser controlada a 0.0002 pulgadas o menos. Altas densidades de corriente y larga duración de pulsos pueden incrementar la profundidad de la zona afectada por el calor a 0.015 pulgadas o mas dependiendo del material que se va a comenzar a maquinar.

Las características generales de una máquina básica de electroerosión por penetración, por lo general incluyen una bandeja, mesa, guías, sistema dieléctrico y una columna sobre la que se monta una cabeza equipada con un servomecanismo para controlar la rapidez de avance del eje en el que está montado el portaherramienta. Debido a que el ancho de separación de trabajo es de suma importancia, la rapidez de alimentación es vital y el control se hace mediante un servosistema hidráulico sensible, o un motor de corriente directa acoplado directamente (que reacciona más rápido a las señales).

La mesa de trabajo se monta en guías ortogonales, con frecuencia equipadas con escalas ópticas para situarla en su posición con una precisión que se aproxima a la de taladros con plantilla. Toda el área de trabajo está rodeada por un tanque, para contener el dieléctrico que circula de la máquina a un tanque de almacenamiento en el que las partículas suspendidas del proceso de erosión se sedimentan. Entonces se bombea de regreso a la zona de trabajo después de filtrarse. Para eliminar el calor generado durante la erosión, el tanque está equipado con un intercambiador de calor para mantener la temperatura de 20°C del dieléctrico.

Los primeros equipos de electroerosión se diseñaron para realizar las cavidades o formas en matrices. Estas primeras máquinas se denominaron de matriz de penetración o de pistón. Dado que en éstas máquinas el electrodo se situaba en posición vertical y estaba controlado por un émbolo, también se han conocido como máquinas de émbolo. A través del tiempo el proceso de electroerosión por penetración ha ido evolucionando, parte de esa evolución se debe a la forma del diseño de las maquinas, en la FIGURA 3b se puede apreciar las tres categorías que puede presentar una maquina de electroerosión.

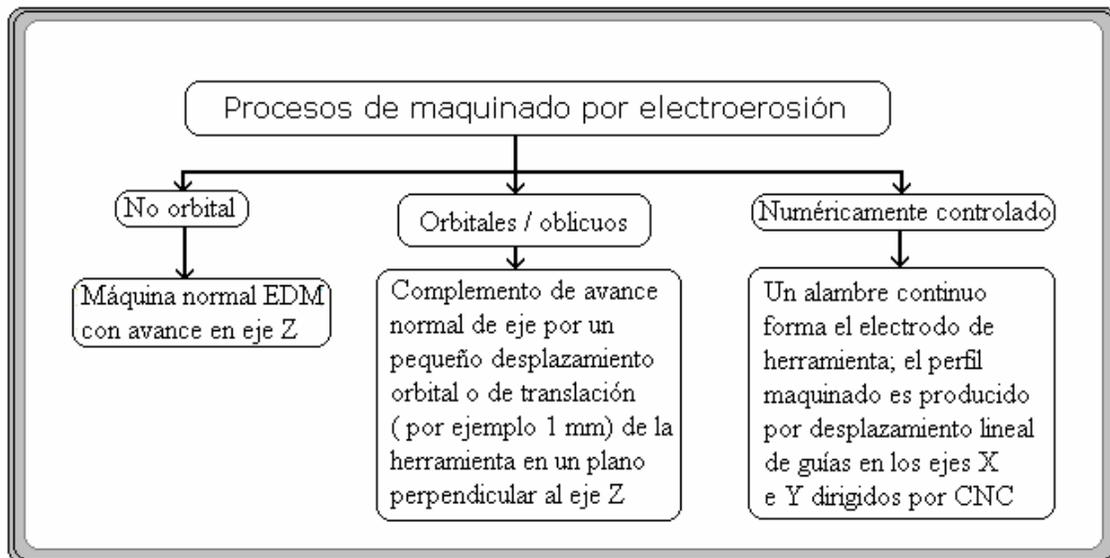


FIGURA 3b. Categorías de máquinas de electroerosión.

Con pequeñas modificaciones, es posible que las máquinas de penetración verticales pasen a desarrollar otras geometrías. Como lo mostrado en la FIGURA 3c, estas modificaciones pueden ser de dos tipos: Cuando el electrodo rota o gira sobre su propio eje y cuando el electrodo realiza una órbita alrededor de un eje perpendicular al brazo de sujeción.

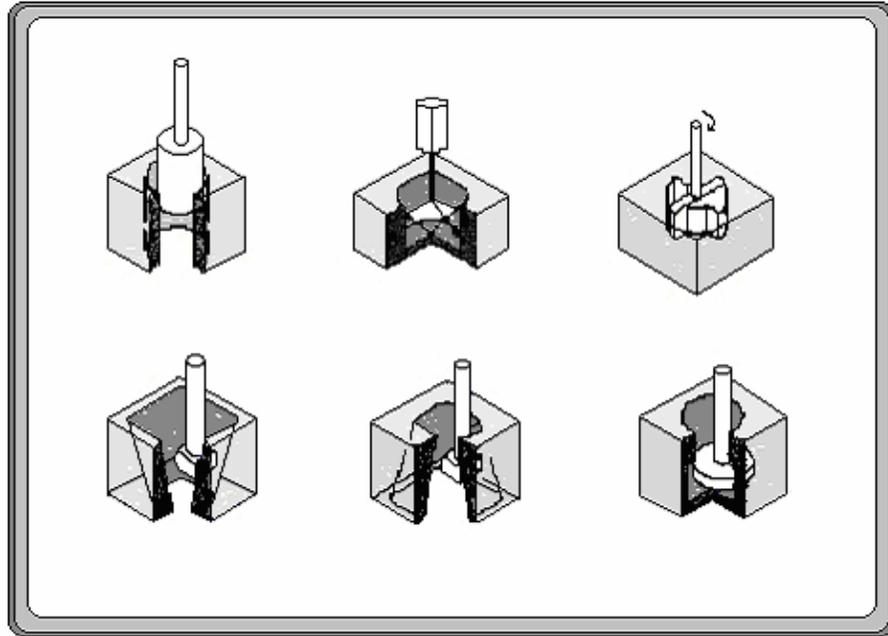


FIGURA 3c. Movimientos del electrodo: Arriba, movimiento de giro del electrodo sobre su propio eje; Abajo, movimiento de orbitación del electrodo.

En este último caso, la trayectoria circular del electrodo y de cualquier punto del mismo, se realiza en un plano paralelo a la superficie de la pieza de trabajo de forma que el giro del electrodo se realiza en torno a un eje perpendicular a dicha superficie.

El efecto de la descripción de la órbita se puede ver fácilmente si imaginamos que ya se ha realizado un agujero dentro de la pieza de trabajo y que el electrodo es extraído. Antes de que el electrodo esté totalmente fuera del agujero, se añade un pequeño movimiento de orbitación con lo que se consigue aumentar el tamaño del agujero, si el tamaño de la órbita se incrementa poco a poco a medida que el electrodo se extrae, entonces, el agujero se convierte en un avellanado por un procedimiento totalmente controlado.

La operación de una máquina básica de electroerosión por penetración se puede mejorar si se dispone de un pequeño desplazamiento de translación u orbital del electrodo en un plano perpendicular al vector de avance. Este movimiento lateral mejora la acción de limpieza del dieléctrico en el **Gap** (abertura de trabajo o distancia disruptiva), con lo que se reduce de manera considerable los tiempos de maquinado y el desgaste del electrodo. De manera opcional, o adicional, para producir orificios de sección circular, el electrodo se puede ajustar un aditamento a máquinas estándar, o bien el aparato puede ser parte integrante de la máquina.

El costo de capital de máquinas de electroerosión es comparable al de máquinas tradicionales de tamaño y tipo equivalente; este factor facilita la comparación del rendimiento económico con otras máquinas. Con frecuencia se practica una combinación de ambos métodos, es decir, la eliminación de la mayor parte de metal de la pieza de trabajo por taladrado o fresado, seguido de procesos de desbaste y acabado en máquinas EDM.

## **Aplicaciones:**

- Moldes de plástico: De precisión y alto volumen (mecheros, nebulizadores, automóviles)
- Matrices de corte
- Hileras de extrusión
- Estampas de forja
- Herramientas
- Matrices de sinterización
- Aplicaciones especiales: Aplicaciones de producción, aviación, energía nuclear
- Materiales conductores de electricidad
- Mecanizado para grandes espesores
- Barrenado de boquillas de los inyectores en la industria del automóvil

### **1.3.2 Electroerosión por hilo.**

Es un desarrollo del proceso de penetración, que sustituye a la herramienta-electrodo por un hilo conductor. En este proceso, un hilo delgado sujeto por sus extremos comenzando por un orificio previamente taladrado y mediante un movimiento de vaivén como el de una sierra, va erosionando la pieza hasta obtener la geometría deseada.

Si la forma a obtener no es muy compleja, es posible adoptar esta técnica, obteniendo importantes ahorros de tiempo y dinero, ya que además de ser más rápido (mientras que con electrodo las tasas de arranque de material son del orden de  $2 \text{ cm}^3/\text{h}$ , con hilo rondan los  $350 \text{ cm}^3/\text{h}$ ), no precisa el mecanizado previo del electrodo.

La tecnología de la electroerosión por hilo aparece por primera vez a finales de los años 60's gracias al nacimiento de los sistemas de control numérico. Sin embargo, no es sino hasta la década de los setenta cuando se empiezan a comercializar las primeras máquinas de hilo. Durante esta década las primeras máquinas, capaces de ejecutar cortes rectos, evolucionan hacia la posibilidad de realizar operaciones de corte cónico por medio de tres ejes controlados numéricamente. De este modo los sectores de la troquelaría de corte y de las hileras de extrusión encuentran una herramienta de gran utilidad que permitía empezar a sustituir de un modo ventajoso, aun a pesar del elevado costo de las primeras máquinas de hilo, a las máquinas de electroerosión por penetración utilizadas hasta entonces.

Es en el cambio de la década de los setenta a los ochenta cuando la evolución de los sistemas numéricos de control, permitió la ejecución de operaciones de corte cónico mediante 4 ejes controlados simultáneamente. Así mismo, durante la década de los ochenta aparecen los primeros sistemas de enhebrado automático del hilo que presentaba un incremento considerable de la automatización de las máquinas.

A finales de la década de los ochentas, los drásticos aumentos de la velocidad de corte obliga a reconsiderar el modo de trabajo que se ejecutaba hasta la época, imponiéndose un nuevo modo de operación que todavía sigue estando vigente en la actualidad.

El aumento de la energía de las chispas, causante del aumento de la velocidad de corte, implicaba una flexión del hilo en el sentido opuesto al movimiento de corte que daba lugar a imprecisiones en las esquinas y radios de pequeño diámetro. Por todo ello, el modo de trabajo en una sola operación de corte que dejaba la pieza terminada, quedó sustituido por una operación de corte a alta velocidad, desbaste, seguido de una sucesión de repasos, entre 1 y 4, que permitían alcanzar la rugosidad y/o las precisiones requeridas.

Estas mejoras, en cuanto a la velocidad de corte se refiere, sumadas a las conseguidas en lo relativo a las operaciones de corte cónico con ángulos de hasta 30° en espesores de hasta 400 mm, y una importante generación de nuevas funcionalidades operativas del CNC, han supuesto que a lo largo de la década de los 90's el sector del molde se haya interesado profundamente en la tecnología de la electroerosión por hilo, consiguiéndose de este modo incrementos en las cifras de ventas.

Así la electroerosión por hilo, que en los 70's apenas representaba un 10% del total de las máquinas de electroerosión vendidas, ha pasado a finales de la década de los 90's a representar una cifra que se mueve en el entorno del 50% de las ventas totales de máquinas con esta tecnología.

Una posibilidad de electroerosión es la que utiliza un hilo metálico móvil como electrodo, de forma similar a como funcionan las sierras de hoja continua, FIGURA 4. El hilo puede estar realizado con cobre, cobre aleado, molibdeno o wolframio, y típicamente tiene un diámetro de 0,25 o 0,5 mm. La relación de desgaste no tiene ningún valor, ya que el hilo se utiliza solamente una vez y avanza a una velocidad comprendida entre 2,5 y 150 mm/s.

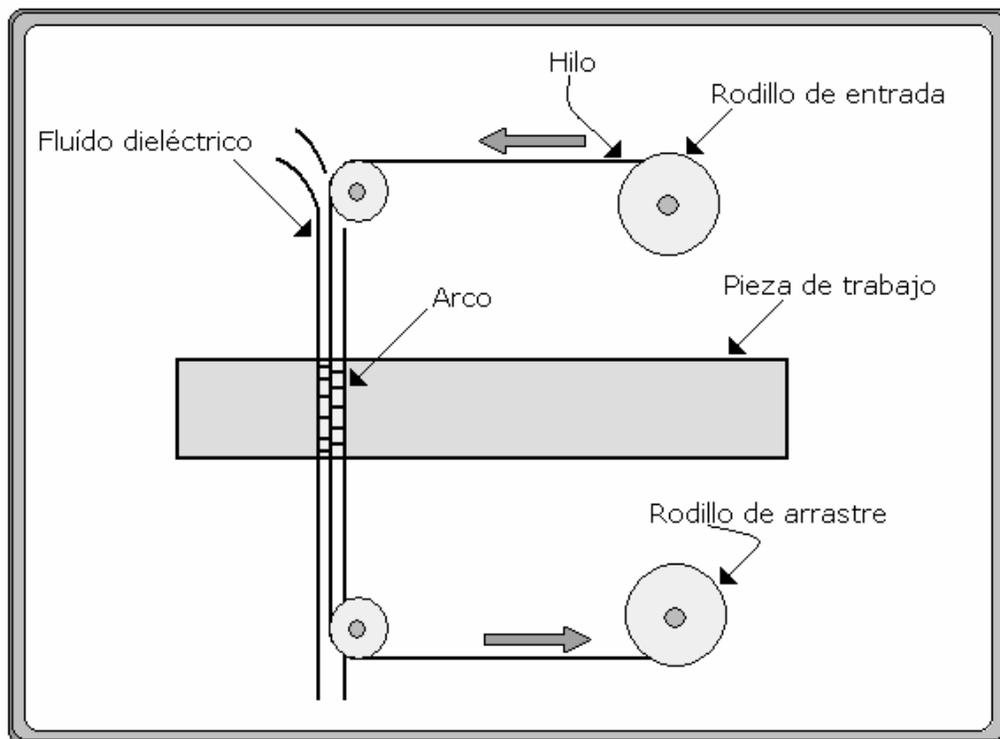


FIGURA 4. Electroerosión por hilo.

En las máquinas de electroerosión por penetración las velocidades de extracción de material se dan en unidades de volumen por unidad de tiempo, de forma equivalente a como se mide una operación de fresado. La electroerosión por hilo es más parecida a un proceso de corte con sierra: la velocidad de arranque del material es área de la superficie cortada por unidad de tiempo. Los valores típicos para corte por hilo oscilan en torno a  $43 \text{ mm}^2/\text{min}$ .

Las máquinas más modernas están incrementando la velocidad de corte. Cuando se utilizan máquinas de electroerosión, las tolerancias dimensionales están en el rango de  $10^{-3} \text{ mm}$ . La electroerosión por hilo se utiliza frecuentemente para el pulido o acabado final de aparatos de medida de tolerancias dimensionales.

Es un proceso que industrialmente se denomina de superacabado. En estas condiciones, lógicamente, las máquinas deben trabajar en condiciones muy ajustadas de temperatura y humedad.

La máquina de EDM con control numérico computarizado (CNC) de electrodo de alambre continuo, obtiene formas complejas de orificios y cavidades de dados y matrices para extrusores o prensas, respectivamente. El electrodo de alambre, que por lo general mide  $0.25 \text{ mm}$  de diámetro, se toma de un carrete que contiene suficiente alambre para la operación continua durante 24 horas, a una velocidad de  $0.1$  a  $8 \text{ m/min}$ . Para trabajos de alta precisión, el alambre se pasa por un dado calibrador y se reduce en diámetro en  $0.015 \text{ mm}$ ; luego se le hace un recocido y se pasa por unas guías de zafiro a un aparato que estabiliza la tensión entre  $0.5$  y  $1 \text{ kg}$ . En operación, se utiliza agua desionizada como dieléctrico y, además de su función básica, se puede utilizar en un chorro concentrado para pasar el extremo del alambre, cuando se hace la preparación, por un agujero previamente perforado en la pieza de trabajo y sobre los rodillos guías para obtener operación automática. El electrodo puede estar inclinado a un ángulo de  $11/2^\circ$  respecto a la perpendicular, para que haya una altura libre de maquinado en el perfil de dados. El desplazamiento de guías en los ejes Y y X está bajo el control CNC y se programa igual que para máquinas CNC convencionales.

La introducción automática del hilo y el preajuste de la pieza de trabajo permiten mantener la producción durante 24 horas al día lo que permite conseguir una elevada productividad, flexibilidad y garantía de calidad. La dificultad básica del proceso radica en el posicionado y sujeción de la pieza dentro del campo de trabajo de la máquina ya que con frecuencia se trata de una operación lenta y laboriosa ya que hay que garantizar que el mecanizado se produzca dentro de los estrechos márgenes de tolerancia y que no se produzcan choques entre los elementos de sujeción y las partes móviles de la máquina. En este tipo de mecanizados es frecuente que el cabezal de la máquina gire para permitir cortes oblicuos por parte del hilo.

Como las bobinas de hilo se mueven alrededor de varios ejes, las máquinas de electroerosión por hilo permiten realizar formas más complejas que las de penetración. Además, producen piezas con una mayor repetibilidad que las obtenidas con métodos convencionales.

La rotación del electrodo tiene un valor especial si la cabeza del electrodo no tiene simetría axial. Supongamos que se está utilizando un electrodo con cabeza en forma de L, una vez fue introducido el electrodo a una profundidad determinada se le puede hacer girar sobre su eje produciendo mecanizados interiores de formas complejas.

La experiencia ha demostrado que siempre que se pueda hay que tender a efectuar el trabajo con electrodos rotativos ya que así se consiguen mejores condiciones de barrido y se distribuye uniformemente el desgaste del electrodo. Por otro lado, la utilización de electrodos rotativos se suele traducir en tiempos de proceso más cortos y una mayor precisión del mecanizado. En este caso se requiere que el sistema encargado del movimiento del electrodo sea perfectamente concéntrico.

### 1.3.3 Taladrado por EDM

En el taladrado por EDM, son comúnmente utilizados electrodos tubulares con orificio, donde el dieléctrico hace su función en el interior del tubo, para facilitar la remoción del material desde el agujero. Ocasionalmente son utilizados rodillos sólidos como electrodos, en este caso la pieza de trabajo puede ser pretaladrada de manera que el dieléctrico pueda trabajar desde la zona de maquinado durante cada succión o inyección. Como no es un taladrado convencional, el movimiento de rotación de la herramienta es innecesario, salvo cuando los agujeros a maquinarse sean irregulares, pero esto puede ser sustituido por movimientos curvos con la herramienta.

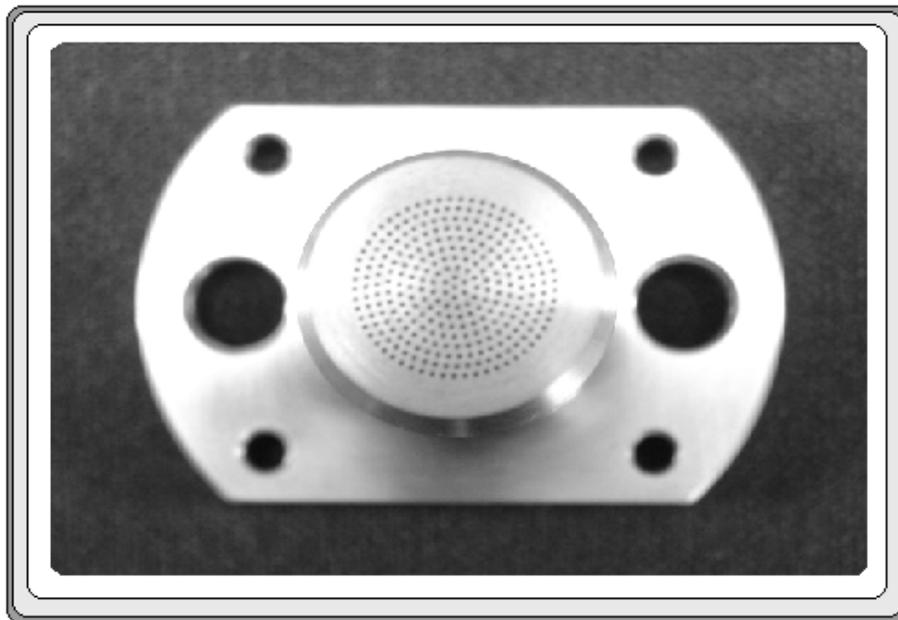


FIGURA 4a. Ejemplo de una pieza taladrada por EDM.

Los rangos de 0.1 mm /min son típicos en el taladrado por EDM, por lo que el proceso es aplicable a la producción de agujeros de diámetros de 0.1 a 0.5 mm, con una tolerancia normal o admisible de 0.01 a 0.05., en un taladrado la mayor chispa que se genera es cuando el cuerpo de la herramienta se encuentra en la superficie de la pieza de trabajo. Es recomendable que de vez en cuando las paredes de la herramienta sean lavadas para evitar incrementar la tolerancia o tapar los agujeros que se están generando, este efecto no es tan grande como en ECM. Es por eso que el EDM es preferido para hacer agujeros con alta longitud con radios pequeños.

La técnica es también usada en los motores de la industria aeronáutica, para instancia en la producción de canales de refrigeración en cuchillas de turbina hace de metales duros, como aleaciones de base nickel. Otras aplicaciones para esta industria conciernen en el taladrado EDM de 36 agujeros en una operación simple en motores jet, anillos combustores fueron descritos por Hatschek (1983).

### **1.3.4 Corte con alambre por electrodescarga (EDWC).**

Es una variación del EDM, un alambre que se mueve entre carretes y rodillos se mantiene tenso por un dispositivo tensionador, sirve como un electrodo y pasa en contacto cercano con la pieza de trabajo. Comúnmente, el alambre es de cobre de 200, 150 ó 100  $\mu\text{m}$  (0.008, 0.006 ó 0.004in) de diámetro; ó 50  $\mu\text{m}$  (0.002in) de diámetro en molibdeno. Ya que el alambre se usa solo una vez, el desgaste no es un factor. La pieza de trabajo se mueve en las direcciones X e Y perpendiculares al alambre por medio de control numérico y cualquier trayectoria debe de recorrerse con facilidad. Puede proporcionarse un tercer eje “timón” para inclinar el trabajo con respecto al alambre para cortar, conificar, estirar o dar relieve. La cantidad de material por remover se gobierna por los mismos factores que en el EDM ordinario, y el estándar de viaje depende del espesor de la pieza de trabajo.

Una máquina EDWC (Wire Electrical Discharge Machining) especificada en  $\text{cm}^2/\text{h}$  ó en  $\text{in}^2/\text{h}$  indica el área en un lado del corte hecho en una unidad de tiempo. Por tanto, con un bloque de dado con espesor de 25 mm un estándar de 15  $\text{cm}^2/\text{h}$  es equivalente a una alineación a lo largo de la trayectoria de corte de 60 mm/h.

Las formas interiores y exteriores pueden cortarse por el EDWC. El trabajo común incluye dados de estampado, partes prototipo y electrodos EDM. Los dados de carburo para estampado o progresivos, previamente tenían que hacerse en secciones rectificadas con exactitud y cuidadosamente ajustadas juntas pero pueden producirse con mucha más rapidez con unidades enteras por el EDWC. Por lo común se mantienen tolerancias tan estrechas como 5  $\mu\text{m}$  (0.0002in). El acabado promedio de superficie obtenido se estima que es desde 650 a 1150nm (aproximadamente 25 a 45 $\mu\text{in}$ ).

### 1.3.5 Electropulido.

Este proceso es comúnmente utilizado para un pulido o acabado superficial final, presentando una buena calidad en partes metálicas. El principio de funcionamiento es distinto al platinado o chapeado, ya que este proceso consiste en una pieza de trabajo que funcionará como un ánodo sumergido en un electrolito, con un cátodo adherido al sistema para que el circuito esté completo.

El resultado arrojado durante el proceso de des-platinado nos dice que hay una remoción rápida de material lo que da una superficie con un mejor acabado superficial.

Durante el proceso los productos obtenidos de la disolución del metal (ánodo) reaccionan con el electrolito formando una película o recubrimiento en la superficie del metal, los tipos de películas o recubrimientos observados son: Uno es un líquido viscoso y otro que se presenta en forma de gas descargado anódicamente, usualmente oxígeno.

Ninguna de las dos películas es adherida sólidamente a la superficie del metal y por consiguiente no afectan a la micro-rugosidad, ambos tipos conforman el macro-contorno, por lo tanto la película o recubrimiento es esencialmente delgado en micro-proyecciones y grueso en micro-depresiones. La resistencia al flujo de la corriente eléctrica en las micro-proyecciones es menor, tomando en cuenta que el flujo de la corriente es mayor en estas últimas que en las micro-depresiones.

El resultado es una rápida disolución en las proyecciones, causando micro-elevaciones en la superficie. Esto da a la superficie del material un esparcimiento de la luz incidente, lo que nos da como resultado la obtención de brillo (apariencia de espejo).

El electropulido es utilizado primeramente para obtener superficies parecidas a espejos con acabados lisos y finos, en lo referente a la rugosidad podemos obtener lecturas de  $0.05 \mu\text{m Ra}$  hasta valores mas grandes como  $0.18$  ó  $0.20 \mu\text{m Ra}$ .

Su desarrollo fue en un inicio para el pulimiento metalúrgico de partes o especímenes de prueba así como también para obtener un buen acabado en piezas con geometrías complejas o difíciles de pulir.

Una aplicación actual e inmediata es el empleo de este proceso en la limpieza de aceros manchados como láminas.

## **1.4 MECANISMOS DE GENERACION DEL PROCESO DE ELECTROEROSION**

### **1.4.1 Máquina para el proceso de Electroerosión**

Una máquina típica de EDM se asemeja a una máquina fresadora vertical del tipo de columna y ménsula con un ariete, o manguito en lugar de una flecha de cortador y con un tanque en la mesa para el fluido dieléctrico. En muchas máquinas de EDM, la herramienta puede montarse en una platina en postes. Se proporcionan medios para circular y filtrar el fluido. Algunas máquinas tienen suministros y controles de potencia de estado sólido.

Las máquinas EDM de herramientas múltiples para producción tienen un número variable de electrodos separados, montados por lo general en un solo cabezal de máquina con un sistema servo y conectados a un solo suministro de potencia. Por lo tanto, un número de partes (hasta 50 partes) puede maquinarse a la vez con un costo unitario bajo.

En la FIGURA 4b se observa una máquina por descarga eléctrica equipada con un control numérico para el posicionamiento, con una gran exactitud del electrodo a un agujero próximo. El potencial máximo de esta máquina, radica en múltiples agujeros o cavidades de trabajo para metales endurecidos y aleaciones exóticas que no pueden ser maquinados convencionalmente.

El maquinado por descarga eléctrica se usa ampliamente para aprovechar partes endurecidas, maquinadas de piezas de carburo; producción de matrices y moldes de metal para estampado así como piezas de metales duros. Se pueden mantener tolerancias muy precisas y posibles acabados de  $0.2\mu\text{m}$ .

Por lo general las máquinas tienen un selector de frecuencia que controla el número de chispas por segundo entre el electrodo y la pieza de trabajo.

En algunas maquinas en lugar de alimentarse en línea recta, la herramienta puede orbitarse, esto es, la herramienta gira sobre un eje excéntrico bajo un servo-control para barrer una forma más grande, cortar conos hacia arriba o hacia abajo, cortes socavados u otros perfiles. En algunas máquinas las herramientas pueden moverse en trayectorias cuadradas o rectangulares o en líneas rectas conforme se alimentan en el trabajo. La pieza de trabajo y no la herramienta, se orbita en algunos sistemas. Además de la capacidad de formar cavidades de muchas formas (algunas difíciles por otros medios), el orbitado ayuda a la acción EDM por el agitado y enjuagado del electrolito, distribuyendo el desgaste en el electrodo, mejorando la exactitud y el acabado. Conforme se desgasta una herramienta, el tamaño puede mantenerse aumentando la órbita.



FIGURA 4b. Máquina de electroerosión equipada con control numérico para posicionamiento (izquierda), generador y control unitario (derecha).

### 1.4.2 El electrodo

El proceso de electroerosión comienza en numerosos casos con la fabricación del electrodo, cosa que no suele ser habitual en los métodos convencionales de arranque de viruta. Una característica exclusiva de la electroerosión es la necesidad de disponer de electrodos preformados cuando se trabaja en electroerosión por penetración y otra la gran frecuencia con que se fabrican piezas individuales con tolerancias muy estrechas por lo que un factor clave es el diseño del electrodo.

Cualquier material que sea teóricamente un buen conductor eléctrico se puede usar como electrodo-herramienta.

Las cualidades que se buscan en el material de la herramienta son:

- Alta conductividad eléctrica
- Rigidez
- Baja resistividad eléctrica
- Alta conductividad térmica
- Alto punto de fusión
- Facilidad de mecanizado
- Costo bajo

Un bajo desgaste de electrodo está asociado con un alto punto de fusión del material; el grafito tiene un valor muy alto de 3500°C, seguido del tungsteno con 3400°C, pero en la práctica, las consideraciones de costo (el grafito puede ser barato; el tungsteno, muy caro), la rapidez de desgaste, la facilidad de fabricación, la disponibilidad en conjunto con el rendimiento en términos de rapidez de avance de metal, textura superficial producida, etc., se combinan para reducir la variedad de materiales.

Debido a la rapidez de desgaste de electrodos, su precio de reposición es un factor importante. Las herramientas se fabrican por diversos métodos, maquinado convencional, EDM, vaciado, grabado químico, etc.; en algunas aplicaciones, por ejemplo el maquinado de un dado de forja, se pueden hacer herramientas de bajo costo de un componente anterior, es decir, una forja ya existente.

La selección de polaridad en generadores de pulsos transistorizados tiene un efecto muy evidente en el desgaste de electrodos. La rapidez de desgaste se puede medir en términos lineales o volumétricos. En operaciones de desbaste, es probable que sea considerable el desgaste frontal de la herramienta y su expresión en términos de una proporción de desgaste volumétrico. En acabados, una pequeña pérdida de detalle, importante en términos lineales pero no volumétricos puede hacer que la herramienta sea inadecuada para usarse más.

En el transcurso de este trabajo se tomó en consideración las siguientes relaciones para el desgaste del electrodo.

$$\text{Relación de desgaste en volumen, \%} = \frac{\text{Volumen eliminado de pieza de trabajo}}{\text{Volumen consumido de electrodo}} \times 100$$

$$\text{Relación de desgaste en el extremo, costado o esquina, \%} = \frac{\text{Profundidad de maquinado}}{\text{Desgaste en extremo, costado o esquina}} \times 100$$

En la FIGURA 5 se ilustra un ejemplo de desgaste de electrodo, que resulta de maquinar una pieza previamente taladrada para reducir el tiempo de maquinado por electro descarga.

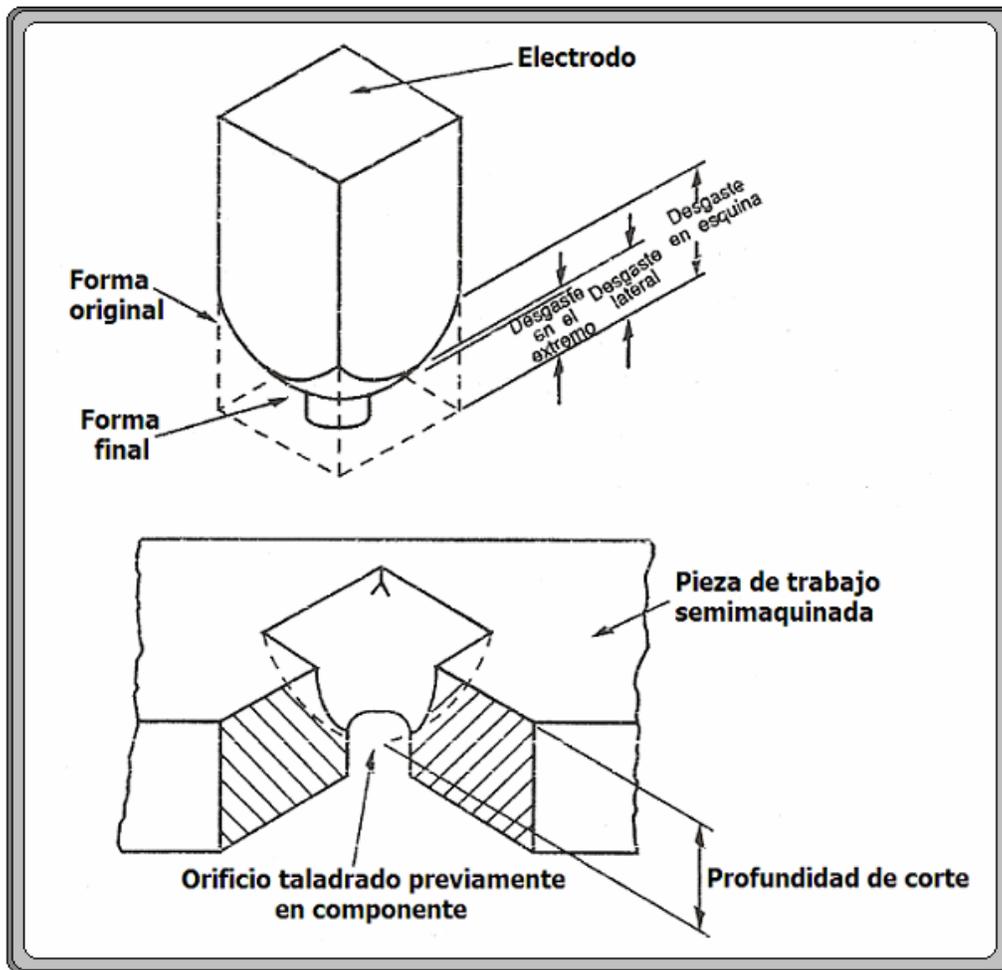


FIGURA 5. Desgaste típico de electrodo en un componente previamente taladrado.

### 1.4.3 Portaelectrodo

Las máquinas de electroerosión requieren de un portaelectrodo de alta precisión con funciones de ajuste de inclinación lateral en las dos direcciones (XY) y ajuste giratorio.

Al portaelectrodo se le suele llamar también portaherramientas y generalmente se acciona a lo largo de los ejes mediante el programa de un ordenador. Este sistema se encuentra conectado directamente al cabezal, que regula el avance del electrodo sobre la pieza, función encomendada a un equipo hidráulico de gran fiabilidad comandado por una potente servo válvula o bien a un servomotor.

Para garantizar un movimiento suave, lo que redunda en una mayor regulación junto con una gran precisión y una larga vida, el conjunto deslizante del sistema va montado por rodadura sobre bolas o patinetes fijos o rodillos. Los portaelectrodos se sujetan al cabezal mediante un mandril de sujeción (FIGURA 6), y de igual forma que en los mecanizados el tamaño de la cavidad del mandril es variable.



FIGURA 6. Sistema de sujeción de la máquina de Electroerosión

El portaelectrodo debe de tener una construcción geométrica precisa además de contar con estabilidad térmica, su especial diseño, en conjunto con la estabilidad en sus componentes y la alta fiabilidad en el proceso de fabricación garantizan una buena precisión geométrica del trabajo a realizar.

Existen portaelectrodos de varios tipos, los mas comunes son los que tienen un chuck para la sujeción de los electrodos de tipo cilíndrico o con formas geométricas realizadas en barras (FIGURA 7), para los electrodos con formas geométricas diferentes se utilizan los portaelectrodos de base plana a los cuales se les coloca el electrodo por contacto y unidos con adhesivos resistentes a las temperaturas y a los componentes del fluido dieléctrico utilizado (FIGURA 8). Otro tipo de porta electrodo es el que se maquina con machuelos para obtener roscas interiores que en conjunto con un conector roscado acepta la sujeción de un electrodo con una misma rosca que el portaelectrodo (FIGURA 9a y 9b).

Los portaelectrodos en la actualidad están diseñados para la adaptación de cambios automáticos de electrodos, por lo general la parte que se conecta al cabezal se endurece mas que la parte que sujeta al electrodo, están hechos de materiales de gran conducción eléctrica por lo que es común que el material mas utilizado para este tipo de elementos sea el acero. Existen también en el mercado portaelectrodos de tipos especiales con aditamentos propios para funcionar de una manera específica, tal es el caso de los portaelectrodos de montaje en escuadra adecuados para electrodos con ángulos rectos en su base o para aquellos electrodos con escasa altura que pueden considerarse como planos (FIGURA 10).



FIGURA 7. Portaelectrodos con chuck.



FIGURA 8. Portaelectrodos de base plana.



FIGURA 9a). Portaelectrodos con rosca interna de acero 1018 fabricados por CNC.



FIGURA 9b). Portaelectrodos con rosca interna de acero templado 1018.

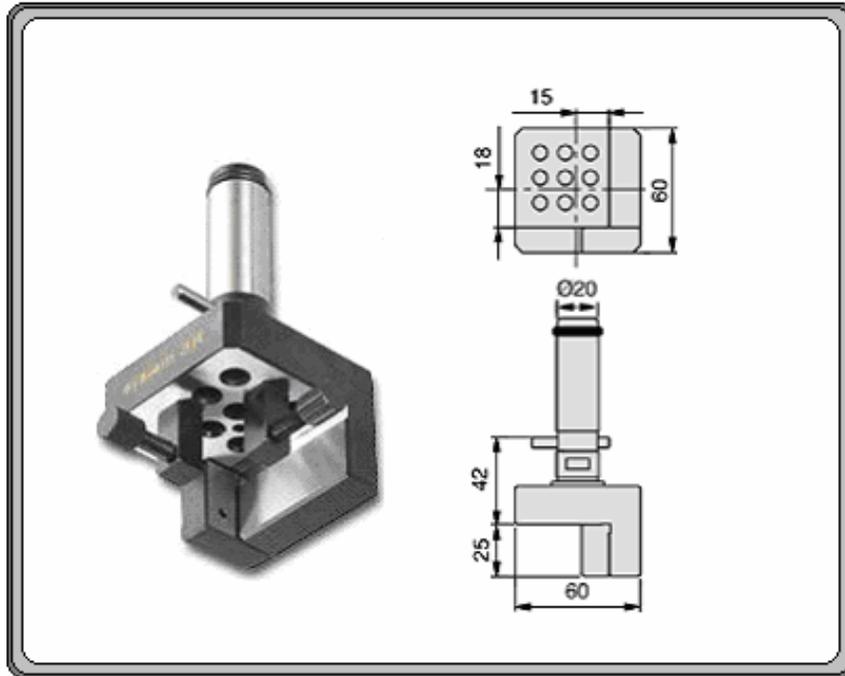


FIGURA 10. Portaelectrodos de montaje en escuadra.

#### 1.4.4 Fluido dieléctrico

Los fluidos dieléctricos más utilizados industrialmente son parafinas, aceites minerales ligeros y agua desionizada. Todos ellos son relativamente baratos, con baja viscosidad y con temperaturas de inflamación lo suficientemente altas para que sea seguro trabajar con ellos. Los productos muy densos y viscosos como los aceites minerales tienen buenas cualidades como la capacidad de concentración del calor y de la intensidad de corriente en la zona de descarga pero presentan problemas respecto a su capacidad de evacuación de los productos de deshecho.

Las propiedades que deben tener son:

1. Baja viscosidad para garantizar descarga eficiente.
2. Alta temperatura de inflamabilidad.
3. No tóxico.
4. No corrosivo.
5. Calor latente alto.
6. Resistencia dieléctrica apropiada, por ejemplo 180 V por 0.025 mm.
7. Rápida ionización a potenciales entre 40 a 400 V seguida de rápida desionización.

De la amplia variedad de líquidos dieléctricos que se fabrican, principalmente se utilizan tres clases:

1. Hidrocarburos.
2. Soluciones acuosas de glicol de etileno.
3. Agua desionizada.

Los hidrocarburos son el grupo principal y pueden considerarse según su viscosidad (TABLA 1). En operaciones de acabado, el Gap es pequeño y se utilizan los aceites más ligeros para garantizar que el lavado se realice de manera satisfactoria. El Gap está menos restringido para operaciones de desbaste, lo que permite obtener ritmos de maquinado más altos con aceites más pesados. En el proceso de Electroerosión, la temperatura de inflamabilidad es importante y el ritmo de maquinado se reduce si un líquido de bajo punto de ebullición produce una cantidad excesiva de gas durante la vaporización. Los gases que se forman en mayor parte son hidrógeno, metano, propano y acetileno. El agua desionizada se utiliza bastante para el EDM en máquinas de CNC de alambre continuo equipadas con una unidad desionizadora.

TABLA 1. Comparación de dieléctricos de hidrocarburos.

Líquido dieléctrico	Temperatura de inflamabilidad	Aplicación típica	Observaciones
Alcohol blanco	40°C	Trabajo pequeño, tolerancias estrechas, definición aguda, por ejemplo cortadores con finos detalles.	Baja viscosidad, útil en aberturas de trabajo pequeño o trabajo fino que no requiera alta velocidad de remoción de metal.
Parafina	50°C	Trabajo mediano, por ejemplo moldes de plástico, troqueles, dados de extrusión.	Buen dieléctrico de uso general; barato
Aceite ligero	130°C	Trabajos grandes, maquinado de desbaste pesado, por ejemplo dados de forja.	Se emplea en máquinas EDM de alta potencia; no se filtra con facilidad

La función que cumple el dieléctrico es múltiple:

1. En primer lugar, aísla y llena la zona comprendida entre el electrodo y la pieza de trabajo.
2. Apaga rápidamente la chispa después de que tiene lugar la descarga, de esta forma se previene la formación de un arco continuo que haría imposible una nueva descarga.
3. Concentra la energía de la descarga eléctrica en la zona de trabajo.

4. Se ioniza rápidamente al voltaje de trabajo.
5. Arrastra el calor y los materiales generados después de cada descarga.

En el dieléctrico coexisten partículas del material eliminado por lo que es imprescindible un buen sistema de filtrado que vaya recogiendo todos estos “lodos producidos”. Por otro lado será necesario seguir las recomendaciones de gestión medio-ambiental encaminadas al tratamiento y reciclado, cuando proceda, de los residuos producidos.

### **1.4.5 Mecanismo de material removido.**

En esta etapa, el retiro subyacente del metal en EDM puede ser muy provechoso. Los electrodos de metal son dos, los cuales funcionan como la herramienta de forma predeterminada y la pieza de trabajo; estos se sumergen en un líquido dieléctrico. Una serie de pulsos de voltaje, generalmente de forma rectangular, de magnitud cerca de 80 a 120 V (en ocasiones más altos) y de frecuencia de un orden de 5 kilociclos, se aplica entre los dos electrodos que son separados por un boquete pequeño, aproximadamente de 0.01-0.5m m. El uso de estos pulsos de voltaje a través de un boquete tan pequeño da lugar a la interrupción eléctrica del dieléctrico. El proceso de la interrupción del dieléctrico es un acontecimiento localizado: ocurriendo en un conducto de un radio aproximadamente de 10 $\mu$ m.

En la ilustración de la FIGURA 11, la interrupción se presenta de la aceleración hacia el ánodo, los electrones emitidos del cátodo por el campo aplicado y de los electrones perdidos presentes en el boquete. Estos electrones chocan con los átomos neutrales del dieléctrico de tal modo que crean iones positivos y fomentan los electrones, hacia los cuales alternadamente se aceleran, respectivamente, el cátodo y el ánodo. Si la multiplicación de electrones por este proceso es suficientemente alta ocurre una avalancha de electrones y de iones positivos. Éstos alcanzan eventualmente los flujos de los electrodos y de una corriente.

Cuando los electrones y los iones positivos alcanzan el ánodo y el cátodo, se incrementan la energía cinética y el calor. Las temperaturas son cercanas a los 8000 ó los 12000°C y los flujos de calor hasta 10<sup>17</sup>Wm<sup>-2</sup> (Watts sobre metro cuadrado), incluso con las descargas la duración es muy corta de tiempo (0,1 a 2000 $\mu$ s), pueden llegar a incrementarse la temperatura de los electrodos localmente más de su punto de fusión normal. Debido a la evaporación del dieléctrico la presión en el canal del plasma se levanta rápidamente a los valores de hasta 200 atmósferas. Estas grandes presiones previenen la evaporación del metal sobrecalentado. Sin embargo en el final del pulso, cuando se retiran los voltajes, la presión también cae repentinamente y el metal sobrecalentado se evapora explosivamente por lo cual, el metal se remueve de los electrodos.

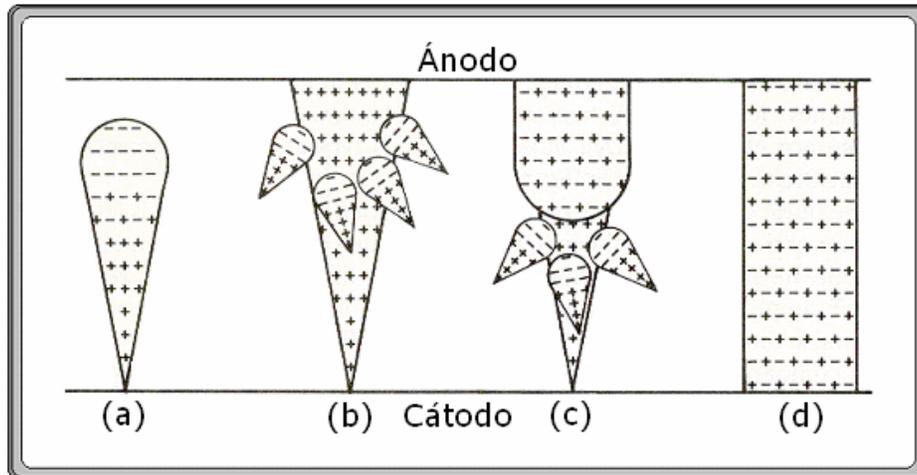


FIGURA 11. Mecanismo de descarga en EDM (Después de Meek y de Craggs, 1953)

- a) Avalancha de electrones, b) Gas ionizado positivamente en el Gap,  
c) Avalanchas secundarias, d) Banda continua desarrollada.

La relación entre la cantidad de metal removido del ánodo y del cátodo depende de las contribuciones respectivas de los electrones y de los iones positivos al flujo total actual. La corriente del electrón predomina en los primeros tiempos de la descarga, desde los iones positivos, existiendo rugosidad y habiendo del orden de  $10^4$  veces más electrones, estos se movilizan con menor facilidad. Por lo tanto la erosión del ánodo-pieza de trabajo debe ser mayor inicialmente que la del cátodo.

Mientras que procede la acción de EDM, el canal del plasma aumenta en anchura y la densidad de corriente a través de las disminuciones del boquete del interelectrodo. Con la fracción de la corriente debido a los electrones que disminuyen, las contribuciones de los iones positivos se incrementan, erosionándose más metal proporcional al cátodo.

La erosión del metal del cátodo puede ser tan alta como 99.5% el desgaste del ánodo que es mantenido tan bajo como 0.5%. En EDM, por lo tanto el cátodo-electrodo se hace pieza de trabajo. El ánodo se convierte en la herramienta y de un material suave como grafito o cobre se tiene la forma que se desea eventualmente en la pieza de trabajo. La descarga se genera a través del boquete del interelectrodo, generalmente en las regiones donde es más alto el campo eléctrico local y cada descarga erosiona una cantidad minúscula de metal de las superficies de la herramienta y de la pieza de trabajo.

La alta frecuencia de los pulsos en el voltaje dan un movimiento electrónicamente conducido, con servomando de la herramienta-electrodo hacia el objeto, permite la descarga que alcanzará a lo largo de la longitud entera de los electrodos. Por estos medios, la forma de la herramienta-electrodo es reproducida gradualmente en la pieza de trabajo, según lo ilustrado en FIGURA 12; Crookall (1973), han derivado una teoría que describe la degeneración de la forma de la herramienta-electrodo durante EDM, su análisis está basado en consideraciones geométricas.

El material derretido de los electrodos resolidifica en el dieléctrico como esferas minúsculas donde sus diámetros se extienden a partir de 2 hasta el 100 $\mu\text{m}$ . Este desbaste es limpiado con un chorro de agua lejos de la zona del maquinado por el flujo forzado del líquido dieléctrico; una velocidad típica del dieléctrico sería menor a 1  $\text{ms}^{-1}$ .

Puesto que el metal removido es efectuado por la acción de las descargas eléctricas, la cantidad maquinada no es influenciada por la dureza de la pieza de trabajo. La cantidad de remoción se da generalmente cerca de 0.008 a 25  $\text{cm}^3\text{hr}^{-1}$ , aumenta con la frecuencia que disminuye la descarga (generalmente 50 a 500 Hz). La superficie rugosa se afecta semejantemente.

Así en EDM dos operaciones se realizan normalmente: un desbaste inicial (con gran rugosidad) para formar la pieza de trabajo y un último desbaste fino, hecho en la cantidad de trabajo maquinado. La operación depende de la intensidad de campo local que es suficientemente alta produciéndose las descargas sobre la superficie de la pieza de trabajo, las descargas ocurren en la práctica al azar permitiendo a los componentes ser trabajados en la máquina para finalizar con exactitud.

Se han encontrado recientemente que las señales de radiofrecuencia son una muestra y una manera confiable de supervisar el proceso de EDM y de discriminar entre la chispa y las descargas del arco (Battacharyya y EL-Menshawy, 1978). El sistema de control adaptante para las máquinas de EDM basadas en este descubrimiento ahora se incorpora en el equipo industrial (El-Menshawy-Menshawy y Ahmed, 1985).

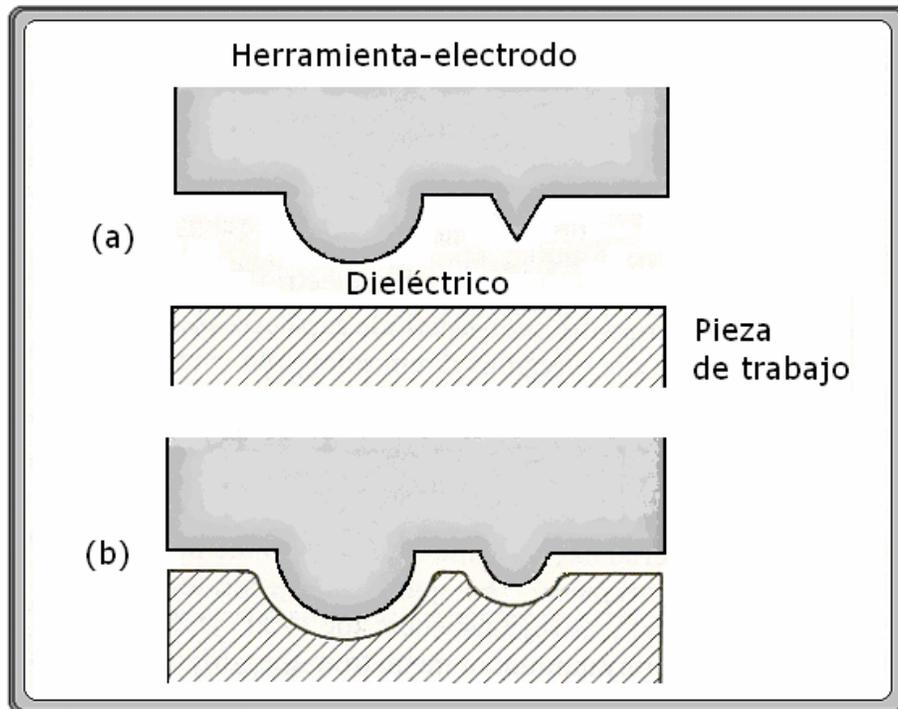


FIGURA 12. Configuración del electrodo por EDM. a) Forma inicial del electrodo y pieza de trabajo, b) Formas finales complementarias del electrodo y pieza de trabajo

### 1.4.6 Relaciones de Lazarenko

B. R. y N. I. Lazarenko lograron controlar la energía de la chispa al utilizar las descargas eficientemente para trabajar en la máquina. En su época, con baja frecuencia las descargas habían sido utilizadas para desintegrar el metal a través de la técnica de separación por medio de una serie de pequeñas erosiones.

Brevemente, el último método establecía que cuando un voltaje se aplica entre un electrodo y un objeto que estén en contacto, estos se atraen periódicamente, sin embargo se contrae por la vibración mecánica de uno de ellos. La operación puede ser ineficiente y al final el acabado superficial es limitado y no hay ninguna reproducción en la superficie erosionada, mucha energía de descarga se pierde en una extensión de área comparativamente grande.

Como alternativa a este método, Ellos dedujeron que las descargas de la chispa dan una duración más corta y altas cifras de repetición, teniendo las calidades necesarias para el eficaz trabajo de la máquina, al sumergir la descarga en un líquido dieléctrico, la energía se podía concentrar sobre un área minúscula.

La herramienta y la pieza de trabajo se sumergen en un dieléctrico parecido a la parafina, y están conectados a cada lado de un capacitor, que se carga de una fuente de corriente directa. A tal efecto, desarrollaron una relación a través de un circuito RC, demostrado en la FIGURA 13.

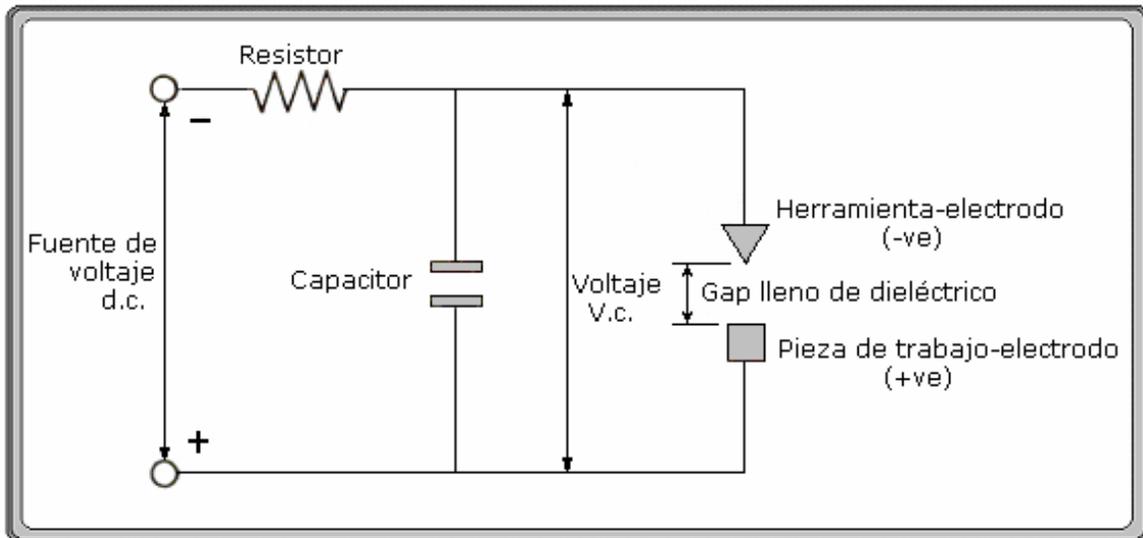


FIGURA 13. Circuito de relajación RC

Según lo indicado en la FIGURA 14, el aumento en el voltaje del condensador debe ser más grande que el voltaje de descarga, y por lo tanto bastante grande para crear una chispa entre la herramienta y la pieza de trabajo, en la región de menos resistencia eléctrica, que ocurre generalmente en el espacio más pequeño del inter-electrodo, es decir el **gap**. La erosión del metal se realiza entre los dos electrodos (de las observaciones de Kohlschutter, menos metal es removido del electrodo negativo, por lo tanto se tomó como herramienta en el circuito de RC de Lazarenko). Después de cada descarga el capacitor se recarga de la fuente de corriente directa por medio de un resistor y la chispa se transfiere al siguiente espacio estrecho, es decir el gap.

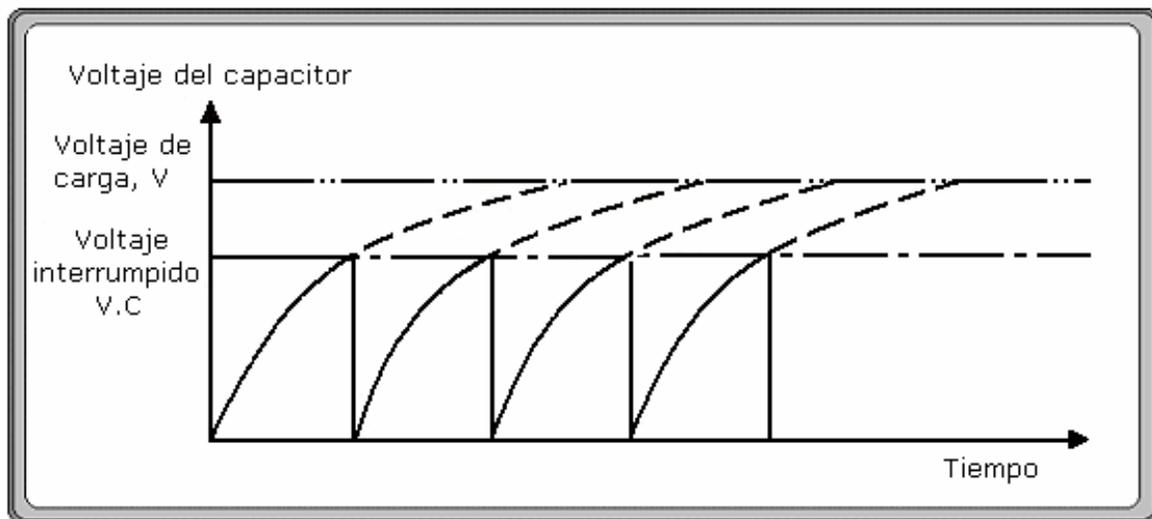


FIGURA 14. Variación en el voltaje con respecto del tiempo en el capacitor

El dieléctrico sirve para concentrar la energía de la descarga en un conducto de área seccionada transversalmente muy pequeña. También enfría los dos electrodos (pieza de trabajo y electrodo), y limpia los productos a través de un chorro. La resistencia eléctrica del dieléctrico influye la energía de la descarga y el tiempo de la iniciación de la chispa. Si la resistencia es baja, una descarga instantánea ocurrirá. Si es grande el capacitor logrará un valor más alto de la carga antes de que ocurra la chispa de la descarga.

Es decir, el índice de la energía y de la repetición de las chispas depende de condiciones en el espacio del interelectrodo o gap. Estas condiciones alternadamente son afectadas por el desbaste producido por la erosión del metal.

Es minúsculo el excedente de área que se produce, ya que la descarga derrite y vaporiza una porción minúscula de la zona a erosionar de la pieza de trabajo, con poco efecto sobre las regiones adyacentes.

El efecto acumulativo de una sucesión de descargas se extiende por la superficie entera de la pieza de trabajo produciéndose la erosión.

El electrodo debe conducir eléctricamente; el latón generalmente era la opción para los generadores anteriores, las máquinas modernas pueden utilizar una gama más amplia para los materiales del electrodo.

La manera hacia estos progresos fue sustentada por la introducción de nuevas clases de generadores que substituyeron el sistema de Lazarenko, permitiendo mejoras significativas en eficacia al trabajar en el maquinado.

## **1.5. CONTROLES PARA LA GENERACIÓN DE PULSOS DE DESCARGA**

### **1.5.1 Circuitos generadores de pulsos.**

Para erosionar metal de una pieza de trabajo es necesario que la máquina EDM genere una chispa cuyas características se puedan controlar para obtener condiciones óptimas para una aplicación específica, por ejemplo, una alta velocidad de remoción de metal o una fina textura de la superficie.

Estos requisitos demandan una fuente de voltaje adecuada para iniciar y mantener el proceso de descarga, así como un sistema que proporcione el control necesario sobre la intensidad, duración y tiempos de ciclo de las descargas. Éstos ocurren entre 2 y 1600 $\mu$ s.

Se han ideado muchos tipos de circuitos generadores, los más importantes para el proceso de electroerosión son dos: Circuito de Resistencia-Capacitancia (RC) y el Circuito de pulso transistorizado.

### **1.5.2 Circuito de resistencia capacitancia (RC).**

El circuito de resistencia-capacitancia (RC) o circuito de relajación, fue el sistema original utilizado para el proceso de electroerosión. Produce texturas superficiales finas, por ejemplo una rugosidad  $R_a = 0.25\mu\text{m}$ , pero las descargas ocurren a voltajes relativamente altos y son difíciles de controlar, lo que resulta en bajas velocidades de remoción de metal y considerable desgaste de la herramienta-electrodo. En la FIGURA 15a se muestra una forma básica de un circuito RC. Al inicio de la operación el condensador está descargado, luego se carga de una fuente de voltaje de corriente directa ( $V_s$ ) a través del transistor que determina la rapidez de carga. La relación entre tiempo ( $\mu$ s) y voltaje se muestra en la FIGURA 15b.

Cuando el voltaje del condensador  $V_c$  se haya elevado al nivel del voltaje de ruptura ( $V_b$ ) existe en el **Gap**, el condensador se descarga en el **Gap** y se erosiona una partícula de la pieza de trabajo. La chispa no se sostiene porque el condensador se descarga más rápidamente de lo que puede recargar a través de la resistencia. El ciclo se repite de manera continua hasta que la operación termina.

Esta secuencia se puede examinar en términos eléctricos porque se sabe que el aumento en voltaje durante la carga de un condensador está dado por la expresión:

$$V_c = V_s (1 - e^{-t/RC})$$

Donde;  $t$  = tiempo de carga, s

$RC$  = resistencia (ohms) x capacitancia (farads) = constante de tiempo

Por lo tanto, el voltaje del condensador se aproxima al de alimentación con una constante de tiempo igual a  $RC$  y la chispa se descarga cuando  $V_c$  alcanza un valor correspondiente a  $V_b$ .

La energía de descarga y la capacitancia están relacionadas en la expresión:

$W = +\frac{1}{2} V_b^2 C$ , lo que indica que un aumento en capacitancias hace aumentar la energía de descarga. La relación establecida por Rudorff (D. W. Rudorff, Principles and Applications of Spark Machining, Proc. I. Mech. E., 171, 495 (1957)), se muestra en la figura 16. Ajustes de máquina para óptima operación en un conjunto dado de condiciones de maquinado involucra un comportamiento en la selección de parámetros del proceso.

Entonces, la energía teórica en una descarga individual de chispa está dada por la expresión:

$$W = \frac{1}{2} V_b^2 C$$

Cuanto mayor sea el valor de  $V_b$  con respecto a  $V_s$ , mayor es la energía descargada. Sin embargo, la rapidez exponencial de carga exhibida por la curva, FIGURA 15b, muestra una clara disminución conforme el valor de  $V_c$  se aproxima al de  $V_s$ . Por lo tanto, si  $V_b$  fuera cercano a  $V_s$ , ocurrirían menos descargas por unidad de tiempo y en consecuencia disminuirá la rapidez de remoción de metal. El valor óptimo de  $V_b$  suele tomarse como 73% de  $V_s$  para una alta velocidad de maquinado.

Si se tiene en cuenta que el tiempo de ciclo es importante para permitir la desionización del dieléctrico y que los residuos se laven del Gap o intersticio de trabajo, se deduce de lo anterior que hay ajustes óptimos de máquina en cuanto a voltaje,  $R$  y  $C$ , para un conjunto dado de condiciones de operación.

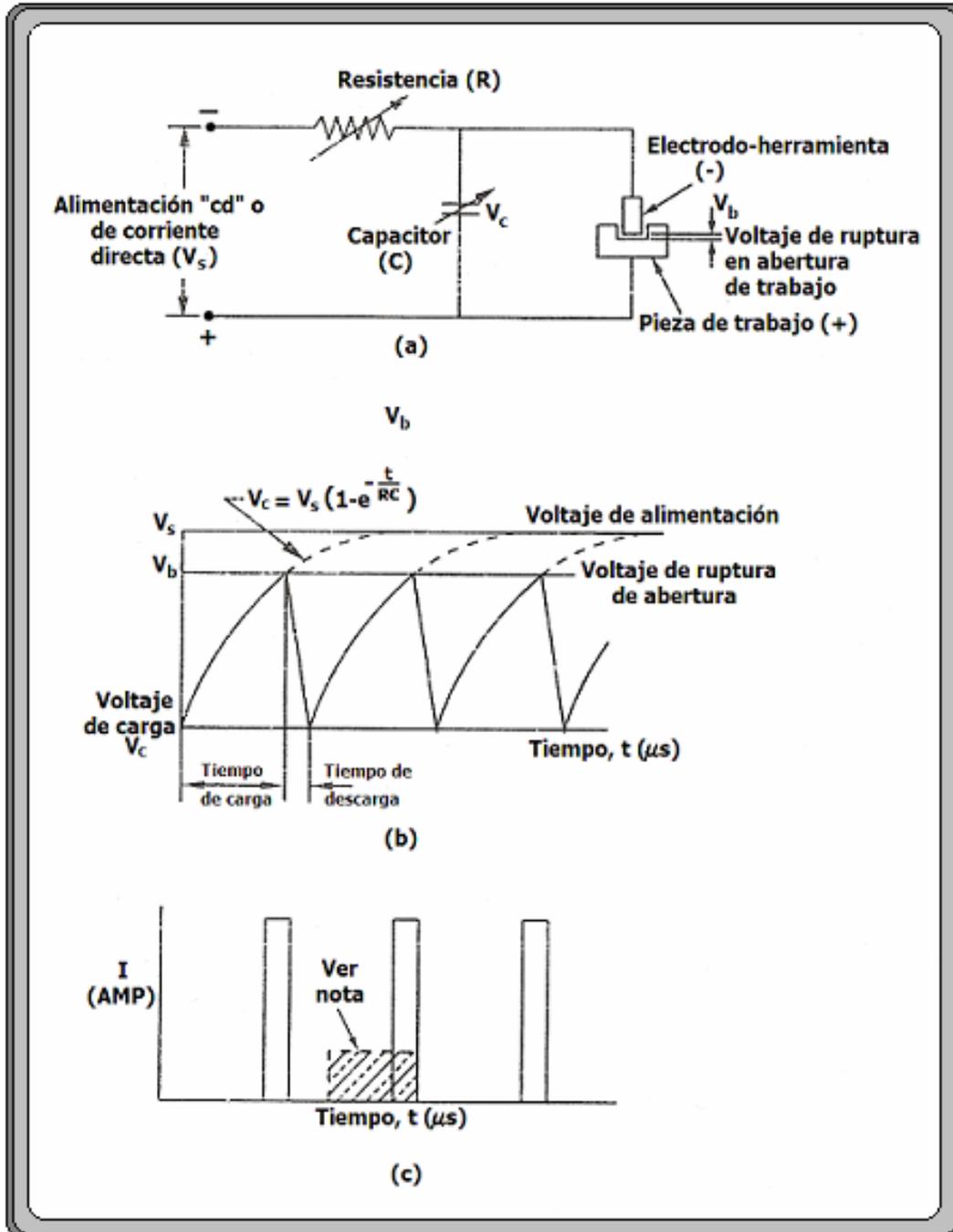


FIGURA 15. Generalización del circuito de relajación: a) Circuito básico de relajación (RC); b) Relación entre voltaje de carga y tiempo; c) Características de corriente en la zona de trabajo. La parte sombreada representa una descarga de igual energía pero de características mas deseables, resultado de una mayor rapidez de remoción de metal y reduciendo el desgaste de la herramienta-electrodo.

Por lo general, el voltaje de alimentación se encuentra entre 200 y 400 V; un aumento en  $V_s$  hace aumentar  $V_b$  y la rapidez de maquinado, pero produce deficiente textura de superficie. Una reducción en  $V_s$  permite usar una apertura de trabajo más pequeño, con lo cual mejora el acabado y la precisión, pero se reduce la rapidez de maquinado. Se obtienen altas velocidades de maquinado si se reduce la constante de tiempo RC para obtener carga rápida, sin embargo, a medida que R se reduce, la frecuencia aumenta y puede llegar a un punto en que se evita que ocurra la desionización y tiene lugar un arco eléctrico.

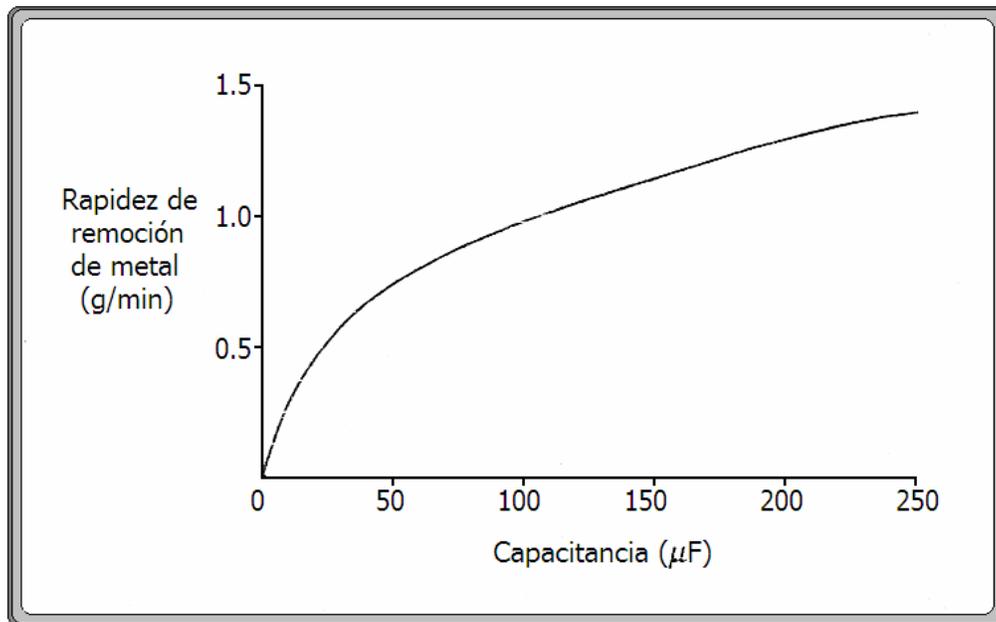


FIGURA 16. Rapidez de remoción de metal como función de capacitancia (Según Rudorff); electrodo de latón y pieza de trabajo de acero endurecido.

### 1.5.3 Circuito de pulso transistorizado.

El sistema que más se utiliza es el generador de pulso transistorizado, que produce altas velocidades de remoción de metal y reduce el desgaste del electrodo, por medio de un control sumamente avanzado de los parámetros de maquinado. Para obtener altas velocidades de maquinado y excelentes acabados superficiales, muchas máquinas están equipadas con circuitos dobles.

La interdependencia de parámetros, una opción restringida de materiales del electrodo y sus altas velocidades de desgaste, están entre las desventajas de los circuitos RC. La introducción de semiconductores ha mejorado el diseño de generadores de pulsos y permite variar la frecuencia y energía de descargas con un mayor grado de control. Además, el voltaje de estas máquinas se reduce a la escala entre 60 y 80 V, lo que permite características de descargas con un perfil menor (FIGURA 17), con el resultado de que los cráteres formados en cada descarga tienden a ser más profundos y más anchos.

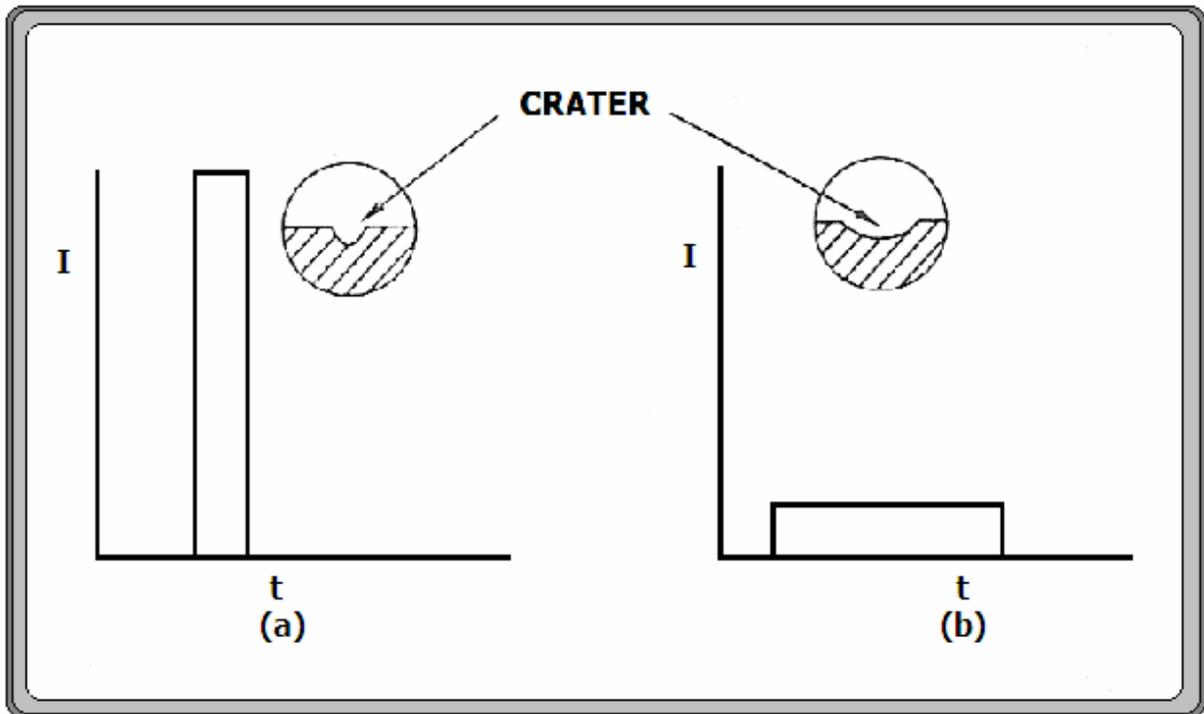


FIGURA 17. Comparación de características de descargas de igual energía producidas por: a) generador RC, b) generador transistorizado

En una forma sencilla del circuito transistorizado, figura 18(a), las descargas se controlan mediante una unidad de conmutación en una frecuencia fija seleccionada por referencia a parámetros de maquinado. Sin embargo, varían las condiciones en la abertura de trabajo, lo que ocasiona retrasos en el encendido. Como el tiempo de encendido y el tiempo de apagado son fijos, el periodo útil de descarga  $X$  varía y disminuye la eficiencia, FIGURA 18(b).

En la FIGURA 19(a) se muestra un circuito mejorado que incorpora retroalimentación, donde las condiciones de la distancia entre electrodos (distancia disruptiva o Gap) las observa un detector que determina entre el momento exacto de circulación de corriente después del retraso de encendido.

La base de tiempo para el encendido se convierte en efectiva y proporciona así un periodo de descarga constante para la desionización y el retiro de virutas por el dieléctrico. La consistencia en la energía de descarga, FIGURA 19(b), resulta en una operación mucho más eficiente.

Por lo general, los generadores del tipo descrito antes son de 25 a 50A.

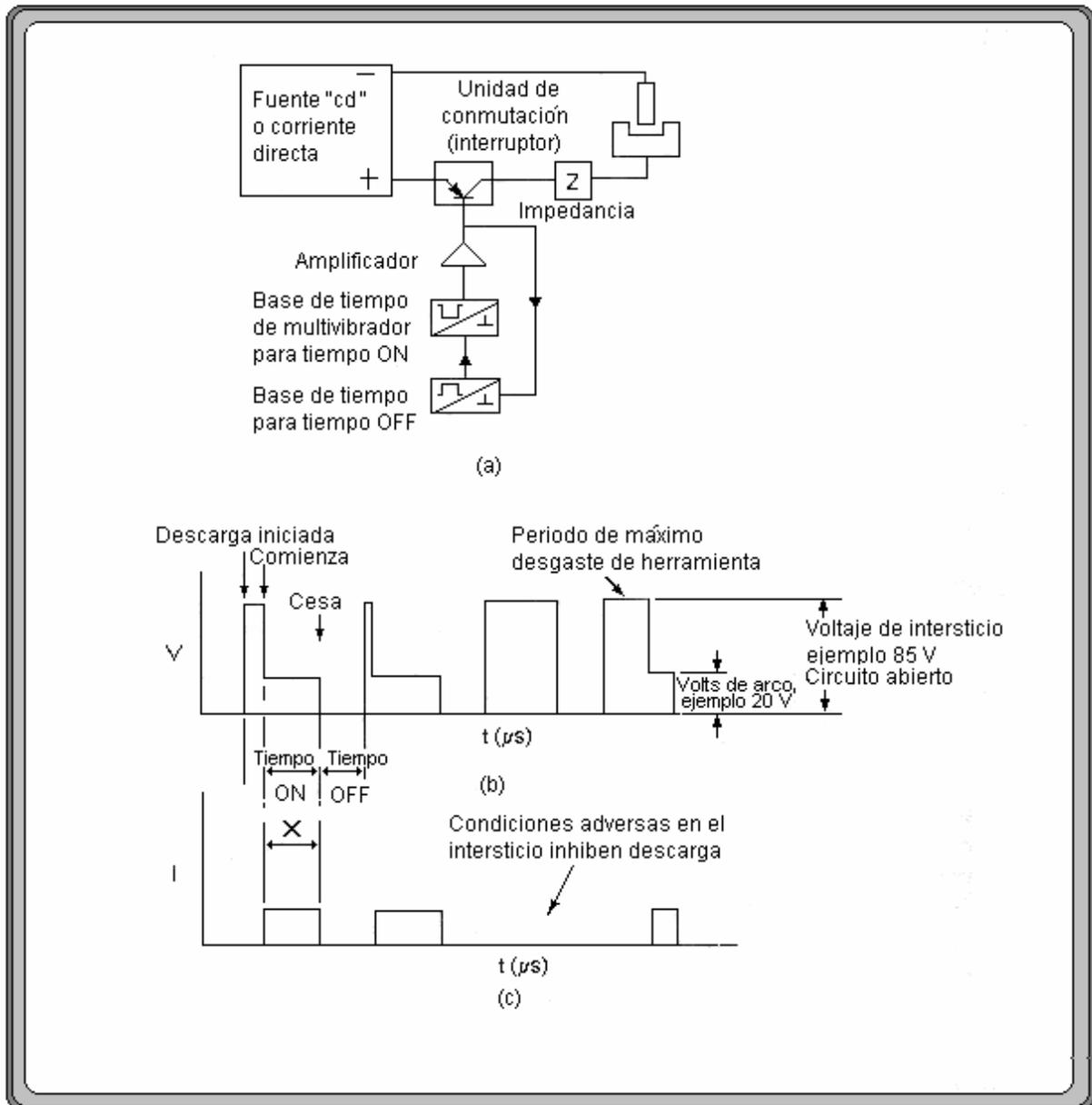


FIGURA 18; a) Circuito generador de pulsos transistorizado básico, b) y c) características de descargas.

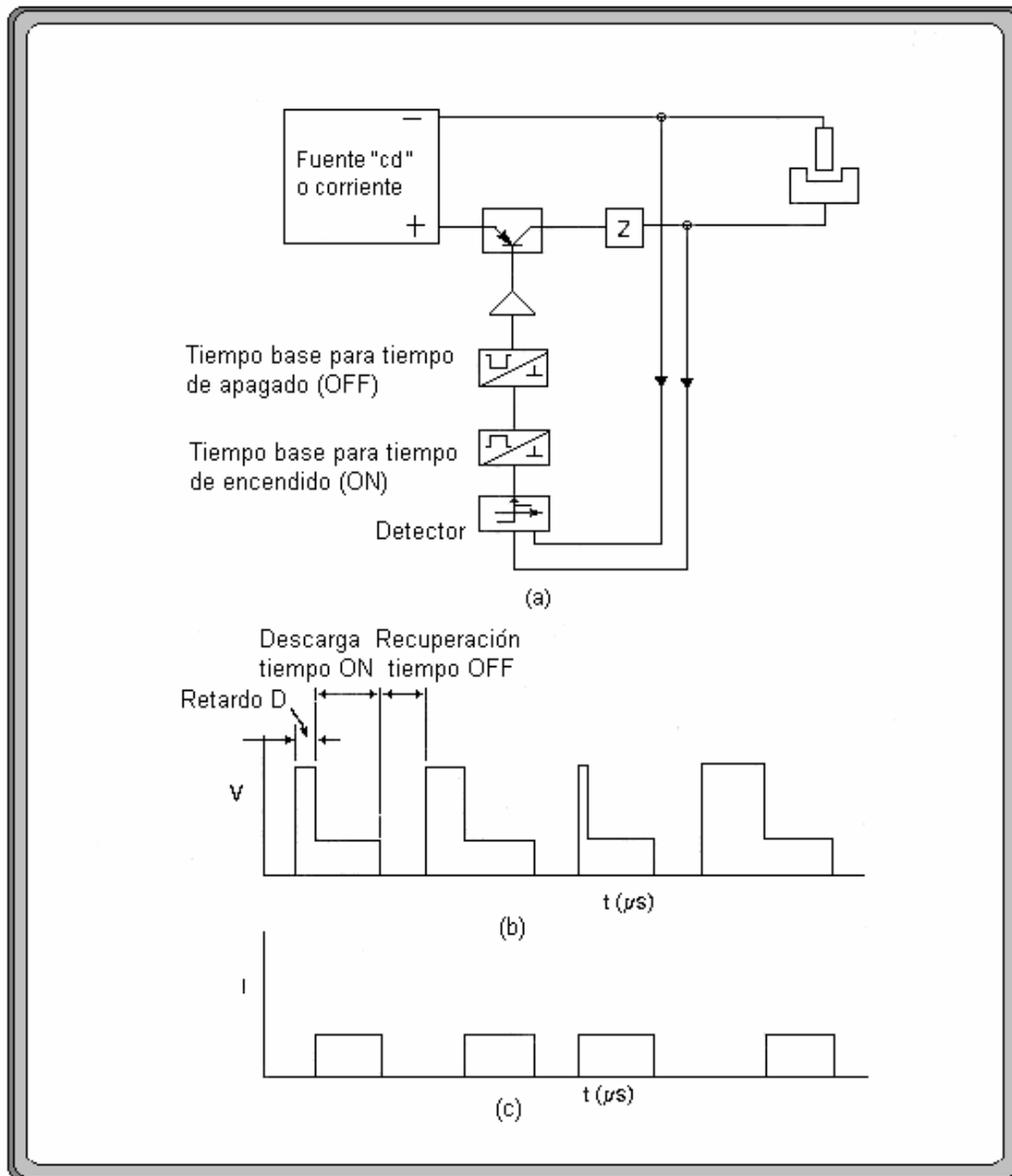


FIGURA 19; a) Principio de generación de isopulsos (cortesía Charmilles), b) y c) características de descargas.

El temporizador en un sistema EDM actúa para iniciar una serie de pulsos durante el curso de una operación y regula la longitud de cada pulso y el tiempo entre pulsos. Estos intervalos y la cantidad de corriente están preestablecidas para la mayoría de los sistemas, pero en algunos sistemas se varían durante la operación para optimizar el rendimiento mediante red de control adoptivo. Con tiempos en microsegundos, los pulsos son bastante cortos y ocurren a frecuencias altas. En un sistema, la duración de pulsos y el tiempo entre pulsos pueden establecerse por separado en incrementos de 1 a 2999 microsegundos; otros tienen controles más gruesos. Los ajustes finos proporcionan control estrecho para acabados.

Algunas máquinas tienen medios para agrupar series de pulsos en trenes cortos con intervalos ajustables entre los grupos. Esto da a los controles más tiempo para corregir condiciones anormales como chispas excesivas o cortocircuitos en el caso que sucedan.

El Gap entre la herramienta-electrodo y la pieza de trabajo se mantiene por un dispositivo de control servogobernado por el voltaje, a través del claro en el tiempo de la descarga de la chispa. En algunos sistemas la herramienta-electrodo se mueve en pulsos para evitar que el arco permanezca en un punto demasiado tiempo y ayuda a expulsar el ruido. Esto permite el uso de más corriente y una cantidad más alta de remoción de metal.

#### 1.5.4 Desarrollo de los generadores de pulso controlados.

Los primeros generadores de descarga de RC fueron incluidos como herramientas en máquinas convencionales. Dieron una satisfacción limitada, aunque las mejoras en su funcionamiento condujeron a los aumentos en las cifras de remoción de metal aproximadamente de 20 a  $250 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ , en el período 1950 a 1960.

Una de las desventajas de los circuitos de RC eran los acabados superficiales: para un acabado final de  $0.3 \mu\text{m}$ , la cantidad de remoción era cercana a  $0.02 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ . Estas cifras de remoción de metal son comparativamente bajas, restringiendo inicialmente el uso de EDM a los usos especiales, y en herramientas de precisión. Algunas de las limitaciones encontradas con el sistema de RC se pueden apreciar en la FIGURA 20, existe una variación en el voltaje por el capacitor en un tiempo determinado, ya que la proporción principal de tiempo pasa a una operación de EDM, los capacitores están recibiendo su carga y no se hace ningún trabajo eficaz en el componente.

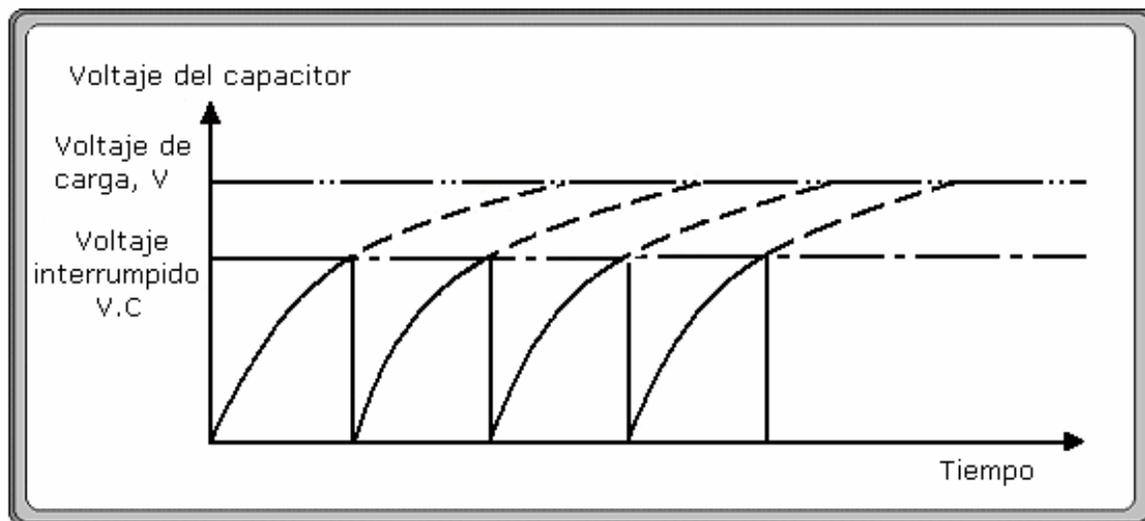


FIGURA 20. Variación en el voltaje con respecto del tiempo en el capacitor.

En la FIGURA 21 encontramos un pico muy alto de la corriente en el instante de la iniciación de la chispa, seguido por un índice rápido de la declinación.

La temperatura de la chispa que resulta de una gran corriente, tiene por resultado un pico mucho más alto de lo que se requiere para quitar una partícula del material de la pieza de trabajo, y puede dar lugar al daño térmico de la herramienta-electrodo, es decir, la duración corta de la descarga y del largo período inactivo coloca áreas considerables en la cantidad del maquinado.

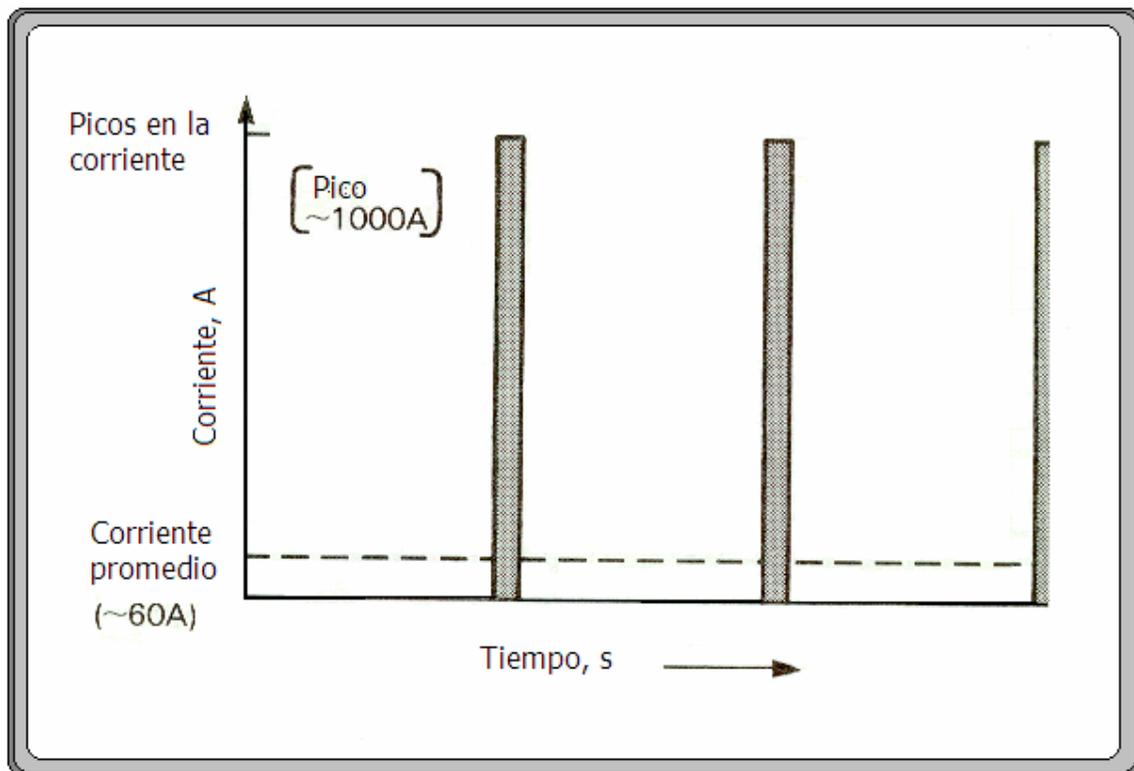


FIGURA 21. Formación de grandes picos de corriente al generarse la chispa.

La reducción en valores de la corriente máxima y el aumento en la duración de la descarga del electrodo se obtendrían a través de la introducción del generador de pulso controlado. Su forma de onda típica se demuestra en la FIGURA 22. En comparación con la Figura 21, los valores reducidos de la corriente máxima disminuyen los períodos inactivos, y dan un aumento en la duración del pulso observado. El efecto de inicio y apagado se denomina ciclo completo.

Puesto que estas variables de proceso pueden ser ajustadas fácilmente, las condiciones de maquinado se pueden seleccionar para los efectos particulares que se requieran.

El pulso de alta energía con baja frecuencia se utiliza para el retiro del material relativamente alto con un acabado final en la superficie un poco áspera. Pulsos de baja energía y alta frecuencia produce un acabado final más fino, a expensas de un índice más lento del retiro del metal. Una máquina moderna de electrodescarga exhibe las características típicas del voltaje-corriente-tiempo ilustradas en FIGURA 23.

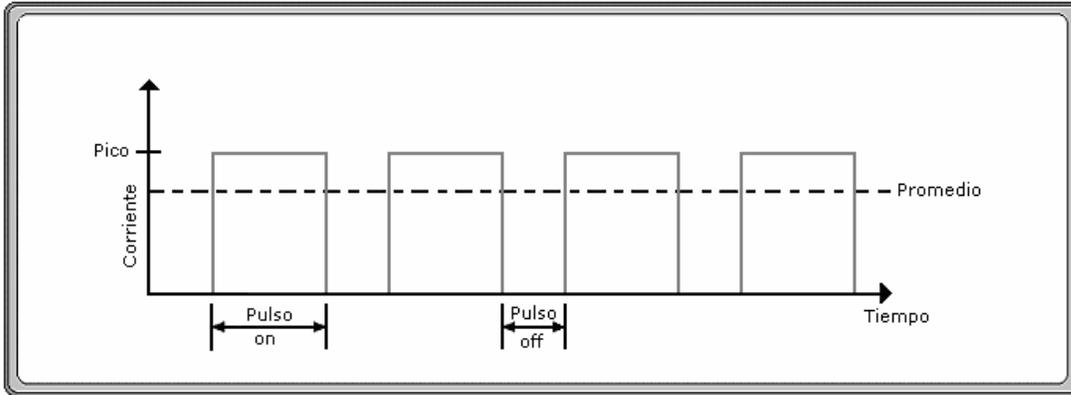


FIGURA 22. Forma de onda típica de tiempo para el generador controlador de pulsos.

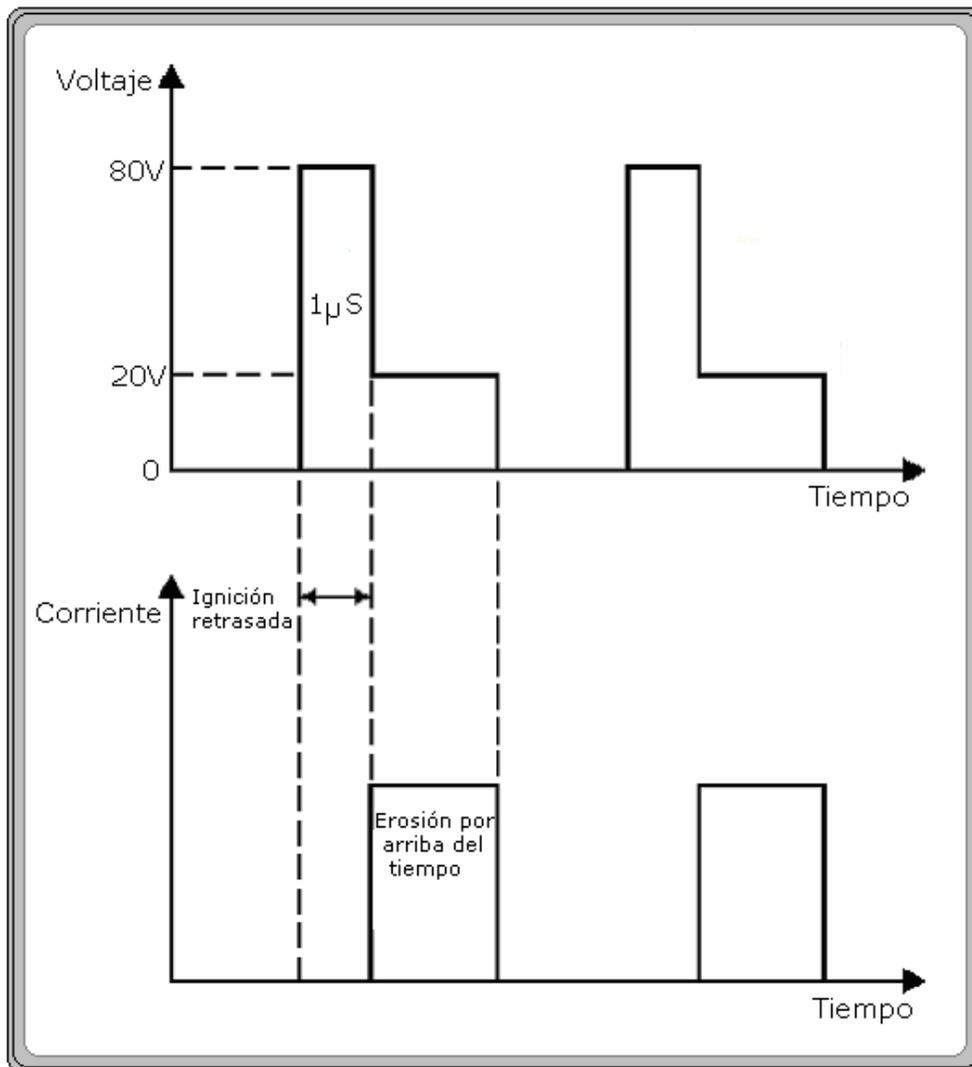


FIGURA 23. Voltaje típico y características actuales para el generador de pulso controlado. El encendido se retrasa en el período que transcurre antes de la interrupción.

El generador de pulso recibe su energía de una fuente de corriente directa que se alimenta vía un resistor y un interruptor electrónico. La magnitud de la corriente, normalmente 1 a 100 A, es determinada por el valor del resistor, del voltaje de la fuente de alimentación, que generalmente va de 60 a 120V, del ciclo completo y del voltaje del arco. Los tiempos de pulso son típicamente 200 $\mu$ s(encendido) 0,1 a 10 $\mu$ s (apagado).

En comparación con el circuito de RC, el generador de pulso permite cantidades de remoción de metal más grandes al ser obtenidas con un gran desgaste reducido a partir del electrodo, para un acabado superficial final. Sin embargo, los acabados finales muy finos son generalmente inalcanzables con los generadores de pulso transistorizados estándares. Para un acabado final, algunas máquinas de electrodescarga incorporan pulso y el trazado de circuito de RC.

La acción de electrodescarga ocurre sobre todo en el gap. Esta posición cambia en respuesta a la chispa de las descargas que ocurren rápidamente en diversos lugares sobre la superficie de la pieza. Pronto llegó a ser evidente en EDM que el tamaño del gap tuvo que ser controlado, para asegurar condiciones estables y proteger las superficies del electrodo contra los daños que se presentan al contacto con el electrodo.

A tal efecto los servomecanismos fueron desarrollados para controlar la anchura de gap (no se mide directamente, sino puede ser deducida del voltaje medio del Gap), los motores de corriente directa o el avance de los sistemas electro-hidráulicos también fueron utilizados. Éstos tienen una alta velocidad de la reacción para responder al cortocircuito, que aumentan el desgaste del electrodo, la condición de circuito abierto, que causan la descarga en un tiempo perdido, y por lo tanto reducen el trabajo del maquinado.

### 1.5.5 Circuitos de fuente de poder.

Algunas formas de aparatos que generan descargas son llamadas “power supply” (fuentes de poder) y son conectadas a la herramienta de desbaste y a la pieza de trabajo.

El tamaño de los cráteres producidos en la pieza de trabajo por las descargas eléctricas depende de la energía de descarga.

La energía de descarga esta determinada por el voltaje del “Gap”, la corriente de descarga y el tiempo que tarda el flujo de corriente, esto es: “Altas frecuencias (número de descargas por unidad de tiempo) resulta en un mejor acabado superficial”.

A la distancia por la cual la cavidad del maquinado en la pieza de trabajo excede el tamaño del electrodo, es llamado **overcut**. El overcut es determinado por dos cosas, el voltaje inicial y la energía de descarga, esto es: “Si la energía de descarga es incrementada por corrientes altas, el overcut se incrementa”

Los circuitos para las fuentes de poder son ilustrados a continuación y están disponibles para proveer de pulsos de corriente directa a las máquinas de electrodescargas. Ninguno en particular es útil para todas las condiciones de maquinado, algunas ventajas de los diferentes sistemas son mostrados en la TABLA 2.

TABLA 2. Ventajas y desventajas de algunos circuitos de fuentes de poder

Tipo	Ventajas	Desventajas
Básico	Simple, bajo costo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajas frecuencias</li> <li>- Rugosidad alta resultante de los altos valores de remoción de material.</li> </ul>
Resistencia-Capacitancia (RC)	Simple, áspero, de calidad confiable, altas frecuencias y bajo costo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativamente bajos valores de maquinado para acabados superficiales finos, pulidos o lisos.</li> </ul>
Generador de Impulso Rotatorio (RIG)	Adecuado para Valores altos de remoción de material.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superficies rugosas obtenidas.</li> </ul>
Pulsos controlados por tubos de vacío	Altas frecuencias, controles que permiten la eliminación de cortos circuitos, buenos valores de remoción de material y desgaste mínimo del electrodo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Características del tubo de vacío y Gap no compatibles: Arc gap = altas corrientes Bajos voltajes Tubo de vacío = Altos Voltajes y bajas corrientes</li> <li>- Se debe usar una fuente auxiliar o transformador para solucionar esta incompatibilidad.</li> </ul>
Controlador Pulso-transistor	(Similar al tubo de vacío) además de altas frecuencias ofrece una posible compatibilidad con el arc gap	

En la FIGURA 24, se muestra cada uno de las versiones de fuentes de poder no importando el grado de sofisticación.

En estos circuitos básicos cuando el switch “S” (interruptor) esta en la posición 1 hay una circulación de la corriente directa (d-c) que carga al capacitor “C”.

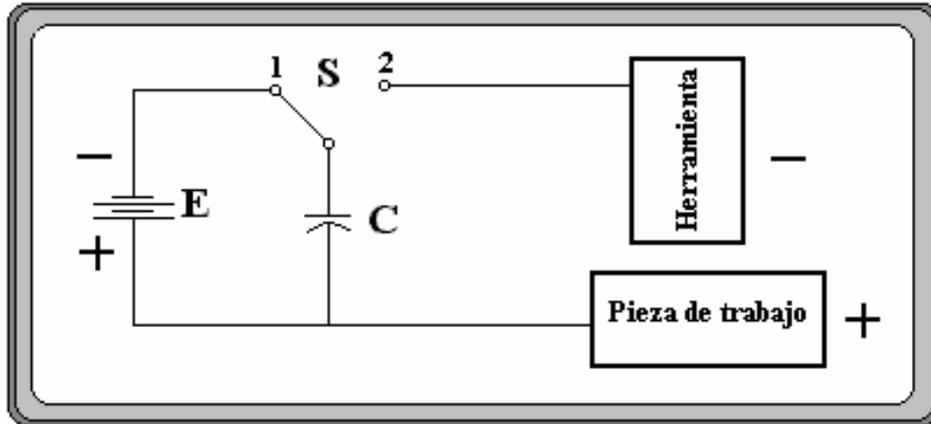


FIGURA 24. Circuito básico de fuente de poder.

Moviendo el interruptor S a la posición 2, se conecta al capacitor cargado y la carga pasa a través del gap, si el electrodo y la herramienta mantiene una relación mecánica cerrada, el capacitor deberá descargarse, y esta descarga emitida pasará a través del Gap y deberá remover un pequeño volumen del material de la pieza de trabajo.

El metal removido por la descarga (se produjo un acabado superficial), y el overcut o gap despejado entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo son parámetros que dependen del capacitor. Estos valores de capacitancia oscilan entre los 0.01 y hasta los 100 microfarads durante el uso normal.

El principal inconveniente para este circuito básico es el problema básico de operación que presenta el interruptor "S" con respecto a las altas velocidades para obtener frecuencias deseadas. Este problema es resuelto por el circuito mostrado en la FIGURA 25, donde el resistor "R" se acopla a la función del interruptor, el capacitor "C" es cargado por una fuente "E".

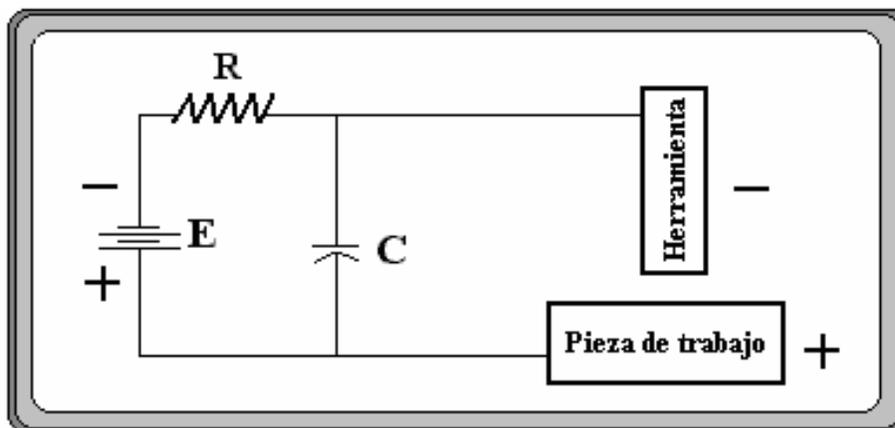


FIGURA 25. Circuito RC

Cuando un alto voltaje cruza al capacitor en forma continua, llega hasta el Gap en donde el capacitor "C" se descarga abruptamente y este ciclo se repite.

La característica básica de este circuito radica en la utilización de cobre como material principal en la elaboración de electrodos.

El lapso o intervalo de tiempo de relajamiento oscilatorio es altamente deseable si se desea tener una superficie áspera, esto es una limitante en las capacidades del proceso de remoción de material.

La corriente del gap es incrementada por la variación de los parámetros C, R y E, de este modo para corrientes muy grandes como 4 o 5 Amperes, el circuito comienza a ser inestable y presentan errores de operación. Lo que es conocido como arco DC, y cuando esto ocurre la pieza de trabajo se quema superficialmente. Las fuentes que presentan este tipo de variaciones son las más comerciales.

Varias opciones han sido utilizadas para producir o mantener un rendimiento asimétrico, estos avances son equivalentes a una fuente de poder DC.

Estos generadores son comúnmente referidos como **generadores de impulso rotatorio (RIG = rotary impulse generators)**. El circuito básico RIG es mostrado en la FIGURA 26.

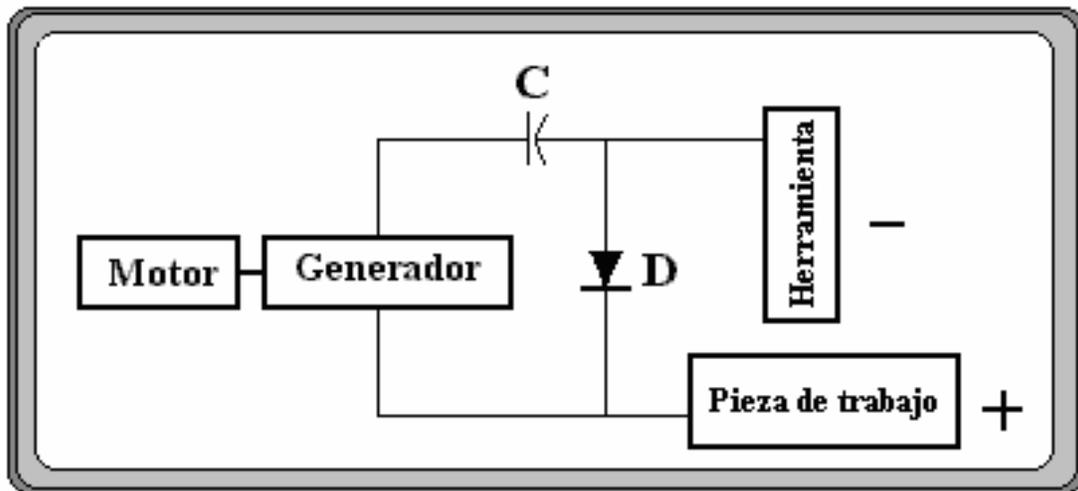


FIGURA 26. Generador de pulso rotatorio

En operación el capacitor "C" es cargado a través del diodo "D", esto ocurre a mitad del ciclo, cuando ocurre esto la suma de los voltajes del generador y del capacitor cargado son aplicados al área del Gap.

Este circuito permite la generación de valores estandarizados de frecuencias altas (a-c) que son utilizadas para producir pulsos unidireccionales.

El RIG es capaz de remover el material (metal) en grandes cantidades (valores altos), pero produce una excesiva rugosidad (terminado burdo).

En todos los circuitos pasados el dispositivo interruptor (switch) fue un factor primario importante en la determinación de parte de la frecuencia del Gap así como la cantidad de energía utilizada en cada descarga.

Uno de los elementos de control que necesitan los circuitos básicos es la habilidad de parar el flujo de corriente en caso de un corto circuito en el área del Gap.

Un método para romper o evitar el corto circuito en RIG, así como, en los circuitos básicos es el mover el electrodo mecánicamente de la pieza de trabajo. De cualquier modo, el retirar el electrodo requiere de mucho tiempo además de que se corre el riesgo de quemar o derretir el área. Por consiguiente la necesidad de una rápida y positiva solución para el flujo de corriente electrónicamente, resulto en el desarrollo de circuitos en los cuales los tubos de vacío o transistores eran utilizados como dispositivos de interruptor.

Estos circuitos son conocidos como **“Circuitos Controladores de Pulso”** (CPC = controlled-pulse circuits).

En circuitos que emplean interruptores electrónicos, los CPC aportan la ventaja de una mayor velocidad en la remoción de metal así como evitar el desgaste excesivo del electrodo (herramienta de corte y desbaste).

En los primeros circuitos de tubos de vacío, el resistor “R” (ver FIGURA 25), fue reemplazado por varios tubos de vacío conectados en forma paralela (mostrando como un tubo sencillo VT representado en la FIGURA 27).

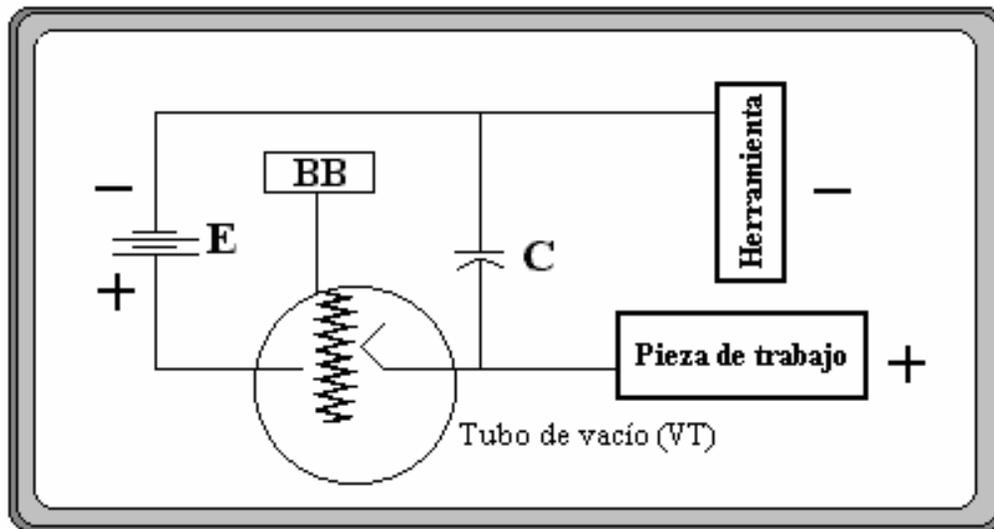


FIGURA 27. Controlador de pulso (tubo de vacío)

Adecuadamente controlado el banco de tubos comienza a comportarse como un resistor variable. Las redes que forman el banco de tubos de vacío de VT sirven, por consiguiente, como dispositivos de interruptor. Las redes están conectadas a un circuito BB control electrónico el cual hace que los tubos giren o se muevan en orden para cargar el capacitor “C” así como también paran el flujo de corriente en caso de que se desarrollen un corto circuito en el área del Gap.

La corriente que fluye en el área del Gap viene del capacitor. Si cualquier corriente fluye en el Gap, los tubos son cambiados a “off” o “parcial off” cuando esto ocurre, los tubos no pueden pasar mucha corriente y por consiguiente aparece una resistencia muy alta (hasta 1000 ohms o mas) en el resto del circuito.

Cuando la corriente cesa o disminuye (el flujo en el GAP), el control BB reduce las vías de redes (tubos). Los tubos comienzan a presentar una alta conductividad (baja resistividad), y el capacitor “C” es cargado rápidamente en preparación para la siguiente descarga en el Gap. El circuito solo describe cual fue la primera definición más general de “pulso” empleado en fuentes de poder EDM. El pulso en circuitos resulta en un incremento substancial en remoción de metal.

Eventualmente esto fue aprendido por circuitos que fueron simplificándose y la estabilidad de operación mejoró por reemplazar el control BB por un simple dispositivo de interruptor en la forma de un fijador-frecuencia oscilatorio, ver FIGURA 28.

Desde que el valor fijo de remoción de material es sustancialmente proporcional al amperaje del Gap (alto amperaje en la fuente de poder) si se hace de esta forma, requiere de un mayor número de tubos de vacío.

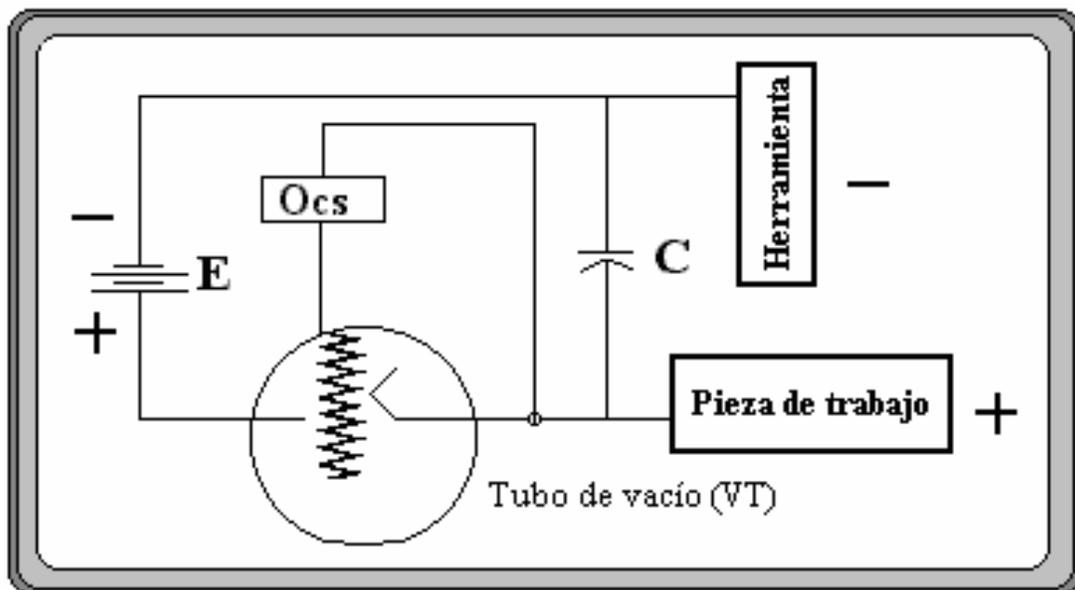


FIGURA 28. Control oscilador de pulso

Las características eléctricas de los tubos de vacío y un ARC Gap no son directamente compatibles, ya que se requiere que por un ARC GAP (arco del Gap) pasen altas corrientes y bajos voltajes, lo contrario a los tubos de vacío ya que estos últimos requieren de altos voltajes y bajas corrientes.

Por consiguiente tenemos tres tipos de circuitos que se desarrollaron para aumentar el valor de remoción de material y así resolver problemas de incompatibilidad entre el Gap y las características de los tubos de vacío, por lo tanto, se recurrió a lo siguiente:

1. Usar un pequeño número de tubos de vacío en un primer lado del transformador donde se pueden operar muy eficazmente a altos voltajes y bajas corrientes.
2. Usar un tubo tipo fuente de poder y aumentar la capacidad o rendimiento con una fuente auxiliar.
3. Reemplazar los tubos de un simple circuito de pulso con transistores los cuales pueden funcionar con alta eficiencia en condiciones normales del Gap, esto es, con altas corrientes y bajos voltajes.

Desde un transformador abastecido con una corriente directa pulsante proveniente de los tubos de vacío, se deberá emitir una corriente alternante sobre un circuito secundario.

Un diodo “D” es utilizado para asegurar la polaridad constante en el Gap. Aunque el arreglo esquemático es altamente recomendable, en eso se permite una sustancial reducción en el número de tubos de vacío requeridos, el uso del transformador impone una limitación en lo referente a las altas frecuencias. La FIGURA 29 muestra un circuito simplificado utilizando tubos de vacío y un transformador.

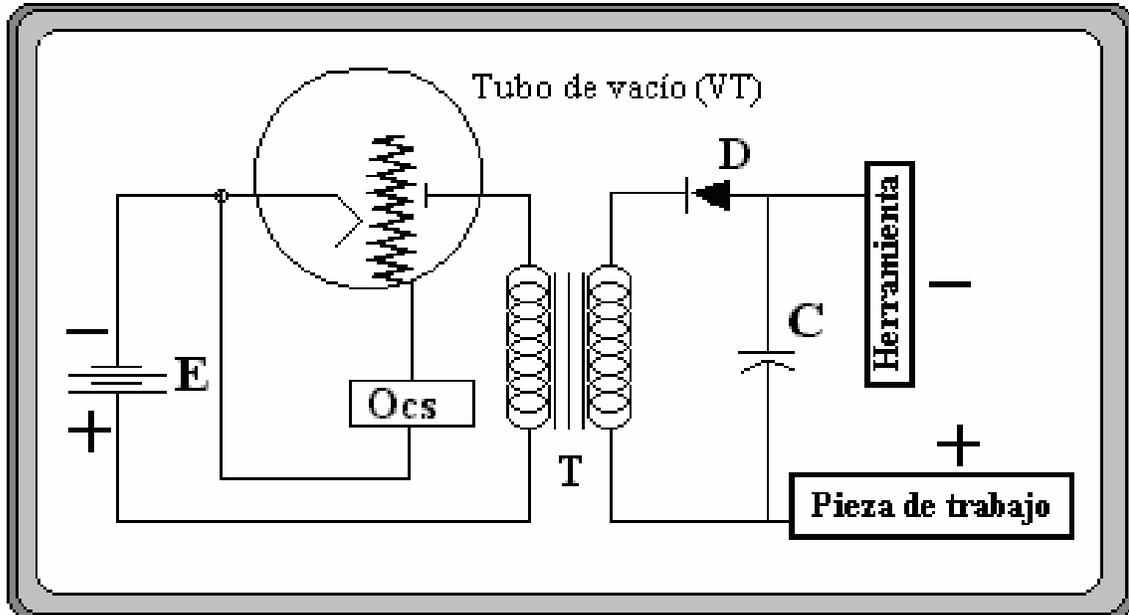


FIGURA 29. Tubos de vacío y circuito transformado

La FIGURA 30 muestra un incremento en potencia o poder del circuito, el cual es una combinación de un tipo de tubo fuente de poder y una fuente secundaria integral.



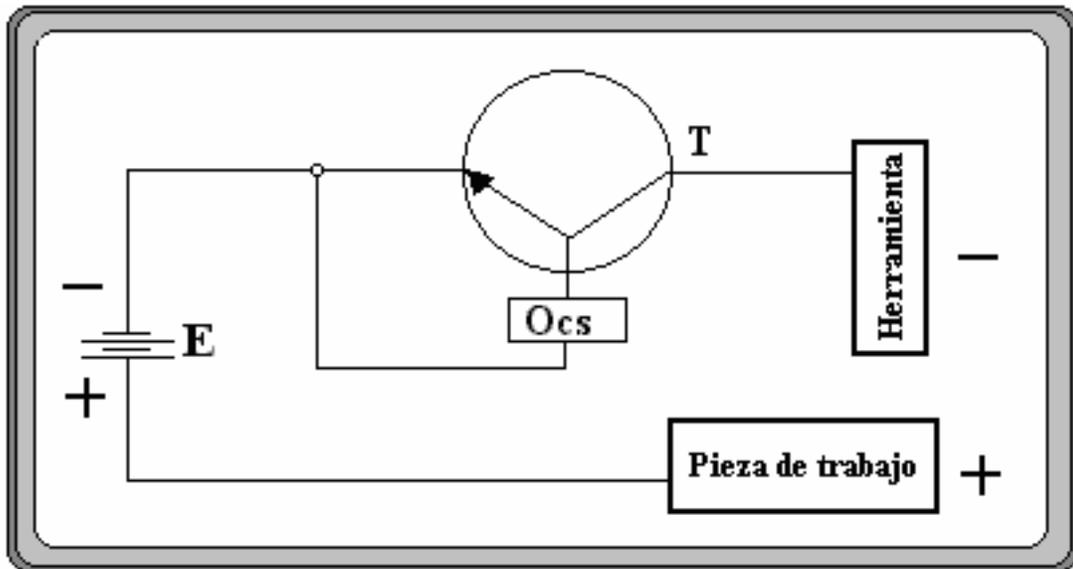


Figura 31. Circuito transistor de pulsos

Los circuitos disponen de un control de corriente o voltaje y generan una ola formadora como un sencillo o repetitivo pulso.

Con este proceso diversas cargas provenientes de una sencilla fuente de poder son conectadas a electrodos separados, aislados uno del otro, y montados sobre un cabezal mecánico controlado por un servosistema. Buenas condiciones en la remoción de material son requeridas para un uso eficiente del proceso EDM.

La ventaja de una fuente de poder controlada por pulsos (controlled-pulse power supplies), hizo posible un nulo o mínimo desgaste en la herramienta de trabajo. Esto es llamado también “sin desgaste” (referido al desgaste de la herramienta o electrodo) o modo limitado de desgaste operacional, la polaridad del electrodo y de la pieza de trabajo son inversas (haciendo que el electrodo sea positivo). Esto permite tener altas temperaturas en la superficie de la herramienta (electrodo) y así el metal de la pieza de trabajo es expulsado para tratar de adherirse al electrodo.

## 1.6 TENDENCIAS A FUTURO

### 1.6.1 Máquinas

En cuanto a las tendencias en máquinas de electroerosión, últimamente se ha estado trabajando en proyectos para presentar máquinas robotizadas, existe un modelo que se está mejorando, tal es el caso del APos-Robot, que es un equipo para hacer orificios por electroerosión a alta velocidad con cambiador de electrodos completamente automatizada.

La empresa Heun ideó el patentado cambiador para sus máquinas APos de orificios por electroerosión a alta velocidad en colaboración con Abacus Maschinenbau GMBH, y ahora, trabaja en el sistema modular de cambiador de electrodos, el cual ofrecerá considerables ventajas en producción en términos de reducción tiempo de parada y en incremento de precisión de mecanizado. El APos-Robot reemplazará los electrodos automáticamente por electrodos nuevos del diámetro apropiado. Actualmente en las máquinas el cambio de electrodo se realiza manualmente, y al utilizar distintos diámetros también hay que cambiar las pinzas de amarre. Además, existen riesgos de imprecisiones durante el mecanizado debido al montaje manual de los electrodos. Todos estos problemas quedarán eliminados con el nuevo sistema APos-Robot.



FIGURA 32. El APos-Robot, máquina fabricada por Heun.

#### Características de las máquinas en un futuro cercano.

- Se especula que las máquinas del futuro cuenten con un cargador de electrodos de mas de 40 posiciones (posible diámetro de 51 mm).
- Máquinas concebidas para poder automatizar todo tipo de trabajos con un reducido costo de inversión.
- Innovadores controladores y de fácil programación, más rápidos y potentes.
- Habilidadas con conexión vía Internet para el envío de mensajes automáticos a distancia, a una PC o teléfono móvil, con información del estado (incidencias) de la máquina, así como para ser reprogramadas a distancia.
- Con módulos que engloben un extenso conjunto de ciclos de medida automáticos (centrajes automáticos en cualquier posición del espacio, alineamiento automático de los ejes-máquina a los ejes-pieza, etc.).
- Generadores con sistemas expertos de erosión: 100% de rendimiento en operación desatendida.

- Altos niveles en los acabados finales.
- Una Tecnología de impulsos a alta velocidad, que permita la obtención de resultados tales como:
  - Tiempos de mecanizado óptimos en trabajos con difíciles condiciones de limpieza
  - Mejora en la homogeneidad de la rugosidad en superficies grandes
  - Posibilidad de realizar ranuras de gran profundidad con las máximas garantías de calidad y precisión
- Amplios recorridos en los ejes X e Y con una gran estabilidad.
- Alta vida útil del filtro de las máquinas para evitar costos de reemplazo y mantenimiento, con una calidad superior de filtrado.

### **1.6.2 Dieléctricos.**

En el campo de los dieléctricos, se trabaja para conseguir mejorar los componentes y enriquecer las mezclas mediante procesos especiales.

Los aceites dieléctricos convencionales son obtenidos de minerales por lo que se están realizando mezclas para obtener productos sintéticos de alto refinado y enriquecidos. Los dieléctricos actualmente se utilizan enfocados hacia algún proceso de electroerosión en particular, las perspectivas en este rubro son las de crear con características especiales dieléctricos que se enfoquen hacia un campo universal para ser adecuado para todos los trabajos de electroerosión desde el más fino proceso de acabado hasta el del máximo desbaste.

Se promueve una mayor efectividad posible en el lavado y mejorar la capacidad de arranque. Según las normas de ecología los dieléctricos del futuro deben ofrecer grandes ventajas, entre ellas las de no producir síntomas tóxicos o alérgicos durante su uso, alcanzar altas temperaturas, además que con las tendencias de contaminación del medio ambiente deberán de tener un límite de tolerancia admitido en la zona de trabajo.

### **1.6.3 Materiales para electrodos e hilos**

Los materiales para fabricación de hilos para la electroerosión se van expandiendo gracias a las diferentes combinaciones de elementos y a sus diferentes recubrimientos, actualmente se fabrican hilos de cobre con recubrimiento de zinc. Las tendencias en la fabricación de hilos van enfocadas para adecuarlos en máquinas con alimentación automática, ya que se prevé que en el futuro solo se crearan máquinas de este tipo, dejando obsoletas las de alimentación manual.

Se trabaja para elevar la rectitud y exactitud en los hilos, ya que mientras más se mejoren estos parámetros se pueden conseguir mejores calidades de superficie así como llevar a cabo cortes muy finos y de gran precisión (en la actualidad se manejan diámetros de 0,10 y 0,15 mm). Se planea mejorar los cortes de superficies muy cónicas los cuales son difíciles de cortar todavía.

Los adelantos en tecnología EDM han generado la sustitución de procesos más convencionales en muchas industrias. De acuerdo con información de la empresa Makino, los desafíos requirieron desarrollar un nuevo material para el electrodo de EDM que utiliza un metal-matriz de cerámica (MMC), ZrB<sub>2</sub>/Cu, lo cual logró que las tarifas de la erosión fueran mucho más bajas que el cobre o los grafitos. "Aunque las tarifas de la erosión son similares al cobre-tungsteno, el nuevo material de ZrB<sub>2</sub>/Cu es menos costoso de fabricar y proporciona tarifas del retiro de un metal más pesado.

#### **1.6.4 Usos**

El uso de la electroerosión está abarcando industrias que hace poco no se imaginaban, ha crecido enormemente en las productoras de piezas de plástico, electrónica y aeronáutica. Comúnmente se utiliza esta tecnología en estampado automotriz y en esta industria en general, así como en las productoras de moldes, troqueladoras y en la industria de partes médicas.

Las perspectivas de penetración de esta tecnología en el país, a partir de la formación de personal calificado, son positivas ya que se prevé que la industria mexicana del plástico tendrá un crecimiento compuesto anual de 8% en los próximos cinco años.

En la actualidad los equipos de electroerosión utilizan un avanzado control numérico con operaciones de hasta seis ejes simultáneos, tecnología de fuente de alimentación avanzada, la cual produce una superficie con terminado de espejo y de gran exactitud.

EDM se distingue por su poder de procesamiento al perforar microorificios de grosor más pequeño que el cabello de un ser humano.

Al ser la electroerosión una tecnología que posibilita el mecanizado de materiales con independencia de su dureza, se está utilizando en la fabricación de moldes para la industria del plástico como tecnología primaria para la elaboración de los mismos y en combinación con el mecanizado de alta velocidad se está logrando incrementar la producción y bajar los tiempos de fabricación con materiales duros.

Esta es una de las constantes aplicaciones en el futuro, la combinación de la electroerosión con otros procesos de producción a fin de formar plantas de fabricación automatizadas que desarrollen por sí solas piezas y equipos que sean utilizados para la industria y para la producción de las nuevas necesidades tecnológicas.

Esta tendencia a futuro de lograr cadenas de producción donde la electroerosión forma parte importante entre las diferentes combinaciones de las modernas tecnologías ya es un caso tangible en el proyecto que tiene trabajando la empresa ONA de España, así como ocho empresas internacionales, en conjunto con la CECIMO, Asociación Europea de Fabricantes de Máquina-Herramienta; puesta en marcha de una cadena de producción de moldes en la cual se pudiesen ver de forma práctica, los extraordinarios avances conseguidos por las diferentes tecnologías que concurren en el proceso de fabricación de un molde desde su diseño inicial y prototipo, hasta su realización final definitiva.

También gracias a trabajos realizados en diversas partes del mundo , el uso de la electroerosión no solo es utilizable en los aceros sino que se va ampliando a materiales tales como las cerámicas conductoras (carburo de boro prensado en caliente, carburo de silicio infiltrado con silicio, y carburo de wolframio en matriz metálica de cobalto) por lo que se espera el frecuente uso de estos materiales en piezas que requieran gran dureza y durabilidad como las prótesis médicas o las diseñadas al uso en el sector aerospacial.

Otra tendencia es la de la utilización de equipo nanotecnológico para producir agujeros de precisión mucho mas pequeños que los ya logrados. Actualmente están taladrando agujeros alrededor de 22 micras (0,022 mm) en acero inoxidable y otros materiales. Los barrenos son bastante pequeños considerando que el espesor de un cabello humano varía entre 50 y 80 micras. El proceso se logra creando un electrodo diminuto con un diámetro de sólo 6 micras (0,006 mm), fabricado mediante un amolador especial.

El futuro en este campo está en reducir al electrodo a menos de 5 micras ya que esto representará un adelanto significativo en la ingeniería mecánica, y beneficiará a los diseñadores en el sector de las tecnologías médicas y de laboratorio. También permitirá a los ingenieros electrónicos la creación de sistemas más pequeños, que cubrirán una amplia gama de productos para la industria y para el consumidor.

Aunque un láser puede hacer agujeros pequeños, éstos son de más pobre calidad comparados con el proceso EDM. El láser produce agujeros que tienden a ser cónicos, mientras que los agujeros hechos con el proceso de electroerosión tienen las paredes paralelas.

### **1.6.5 Electroodos.**

Una de las tendencias a futuro en cuanto a los electrodos es el de eliminar los pasos requeridos para ser maquinados en su forma y sus características de trabajo. Estos pasos son un proceso agregado impuesto por la misma tecnología para trabajar el proceso de EDM y antes de que un electrodo pueda ser trabajado a máquina, los numerosos pasos tienen que ser terminados por diseñadores y los programadores del control numérico.

La tendencia es que muchos de esos pasos se vayan automatizando, haciendo la producción del electrodo más rápido y más fácil. Este desarrollo promete dinamizar situaciones donde es inevitable la electroerosión. También ayuda a hacer el proceso EDM mas atractivo situándolo como la tecnología más eficiente cuando están implicadas las formas complejas de un molde. Actualmente ya se han introducido paquetes de uso de CAD/CAM para automatizar el proceso del electrodo (Figura 33); tales sistemas deben tener capacidades de análisis para la selección del área de mayor descarga eléctrica, capacidades para la extracción, herramientas avanzadas para la creación y la modificación del diseño del electrodo y sus características especiales.

### 1.6.6 Avances recientes en EDM como un proceso de acabado superficial.

En un reciente desarrollo, ingenieros de Mitsubishi Electric. Han desarrollado un proceso EDM por hilo con una fuente de poder “**anti-electrólisis**” (AE).

Experimentando con este nuevo sistema muestran que la corrosión en la superficie de la pieza de trabajo se puede evitar.

Uno de los problemas de EDM es la formación de “**micro-grietas**”, las cuales pueden ser evitadas, y el uso de la fuente de poder con una adecuada uniformidad en los pulsos ha sido de ayuda para reducir el número de micro-grietas en la superficie EDM.

En un intento por obtener acabados superficiales extremadamente lisos y finos por el proceso EDM, diferentes tipos de composiciones (partículas) han sido suspendidos en el líquido de trabajo, estas partículas pueden ser silicón, aluminio y grafito.

En el caso convencional de EDM, durante la operación final, el gap es muy pequeño, dando como resultado que ocurran comúnmente descargas anormales que afectan a la superficie de trabajo. El uso de las partículas suspendidas en el líquido de trabajo nos da como resultado el incremento de la distancia del Gap durante el trabajo.

La distancia efectiva del Gap de trabajo depende de la concentración de las partículas y del tipo de estas en el fluido de trabajo. Los experimentos nos muestran que la distancia efectiva del gap de trabajo se incrementa hasta en 10 veces en comparación con los fluidos convencionales de trabajo.

Las partículas suspendidas en el fluido de trabajo también ayudan a una correcta dispersión de la descarga eléctrica, la cual es indispensable para poder obtener un buen acabado superficial (fino), por otro lado también se incrementa la resistencia a la corrosión en la pieza de trabajo.

El acabado superficial obtenido por el empleo de fluidos con partículas suspendidas muestra valores de rugosidad de 0.6 a 1.8  $\mu\text{m}$   $R_{\text{máx}}$ . El proceso EDM está comenzando a una llave en los procesos de fabricación, sobre todo en los casos de penetración (moldes), así que también comienza a ser necesaria la automatización del proceso.

Ingenieros de la Toyota Technological Institute han desarrollado una técnica para eliminar el pulido manual después de EDM.

Durante el maquinado por penetración hay formación de puntas, las cuales son removidas de la superficie por medio de EDM en su modalidad de electrodo con movimiento planetario, esto se hace bajo altas condiciones en el cuidado de la herramienta (obtención de un pulido mediante movimientos planetarios).

En orden para obtener un acabado superficial tipo espejo sobre la pieza de trabajo se necesita un material que sea resistivo eléctricamente como el silicón que puede ser empleado como un electrodo. Esta mejora en el acabado superficial es notable; la rugosidad en la superficie esta entre los valores de 2 a 3  $\mu\text{m}$ . De cualquier manera (por que el silicón es duro y quebradizo) el formar un electrodo en una forma resulta muy difícil. Ahora el utilizar partículas suspendidas de silicón en el proceso EDM ayuda a obtener acabados superficiales de manera más rápida.

Todos los métodos anteriores han sido demostrados en el laboratorio para obtener acabados superficiales tipo espejo, de cualquier modo en otros casos donde el área es muy grande (mayores a 300 mm<sup>2</sup>) no se puede utilizar el maquinado por EDM para obtener buenos acabados superficiales.

Ya se cuenta con un nuevo método de obtención de acabado espejo, en este método la duración de la chispa y la pequeña descarga de corriente (con la mas pequeña energía de descarga) han sido usadas en orden para reducir la dependencia de la rugosidad superficial sobre el área de trabajo, una parte inducida del campo eléctrico es utilizada durante el maquinado. El concepto es para reducir el espacio en el cual la energía eléctrica es almacenada antes de la interrupción. Ha sido demostrado que la rugosidad del acabado superficial obtenido después de EDM puede ser mejorado por el uso de un **controlador de radio-frecuencia (RF)**. En presencia de una mala condición de flujo la posibilidad de que ocurra una estabilidad en el arco trae como consecuencia daños de tipo térmicos en la superficie de la pieza de trabajo, de aquí es importante el tratar de detectar cuando ocurre la estabilidad del arco.

Buscando mostrar que una chispa generada por una descarga normal genera una **alta frecuencia (HF)** en forma de sonido que es parte de la descarga de voltaje y que son emitidos como **signos RF** (radio frecuencia). La intensidad de los signos **HF** o RF caen conforme hay cambios de las condiciones en el GAP que van de una descarga normal hasta la presencia de arcos destructivos en el área de trabajo. Los controles “RF” han sido hechos para incluir una función isoenergética en el proceso, y por ello el circuito RF ha sido mejorado. La operación EDM que se lleva por separado (excluyéndola del RF) nos muestra un avance en la mejora del acabado superficial en un 40%.

Como se mencionó antes, un acabado superficial uniforme por el proceso EDM aplicado a grandes áreas es muy difícil de obtener. De cualquier modo, se ha desarrollado un sistema de cargas eléctricas para texturizar, produciéndose una mejora en el control de la rugosidad superficial. El sistema de textura por descarga eléctrica incorpora un monitoreo de RF, unidad controladora, un único circuito del gap con medidor de voltaje y un **MOSFET** (metal oxide semiconductor field-effect transistor) para el interruptor.

En otro intento para obtener óptimos acabados superficiales por EDM, se puede llegar a una modificación de la superficie pero ahora auxiliándonos de electrodos compuestos (metalurgia de los polvos). En esta nueva técnica, el electrodo esta hecho de polvos compactados que generan un acabado superficial mas fino o mejor que si se emplearan electrodos sólidos ya que la superficie final presenta menor número de micro-grietas o algún otro defecto, pero la desventaja de este proceso radica en el desgaste rápido del que son objeto ya que no muestran una resistencia al desgaste como los electrodos sólidos.

El proceso EDM esta comenzando a tomar importancia recientemente en lo referente a maquinados avanzados de materiales cerámicos para muchas aplicaciones, también se observa que el tamaño de grano de las fases dispersas juega un papel importante en lo que se refiere a la rugosidad superficial.

Los nuevos desarrollos en el campo de las ciencias de materiales han dado nuevos métodos ingenieriles para materiales metálicos, compuestos y alta tecnología en cerámicos.

En el caso de los cerámicos EDM, (rugosidad y acabado) resulta, ser una mejor alternativa con respecto a otros tipos de maquinado convencional como son el taladrado, esmerilado y corte, esto es por que EDM es un proceso térmico el cual da un maquinado medio o aceptable de los cerámicos no importando que estos últimos sean muy duros y fuertes.

La calidad del acabado en los cerámicos muchas veces es superior al obtenido por procesos convencionales de maquinado, esto combinado con una continua mejora en los acabados superficiales (extremadamente bueno) nos da como resultado que EDM definitivamente es la mejor opción para el maquinado de materiales cerámicos.

De cualquier modo el material cerámico tiene un alto punto de fusión en comparación con los metales, en general el valor de la cantidad de material removido de los cerámicos es menor con respecto al de los metales.

El mecanismo de remoción durante el EDM de los metales esta basado en un fenómeno de fusión y vaporización. En el caso de los cerámicos el material removido se debe a dos tipos de mecanismos, dependiendo de los puntos de fusión.

Se busca no llegar precisamente al punto de fusión de los cerámicos ya que esto implica un mayor consumo de energía en el proceso, el bajo punto de fusión que los cerámicos exponen se debe a una falla en la remoción de material debido a un golpe térmico (spalling). El spalling ocurre cuando los grandes esfuerzos internos creados por un cambio en el gradiente de temperatura causan que el material presente laminaciones u hojuelas lo que provoca en cierto modo un efecto de planicidad.

Los cerámicos que son maquinados por spalling muestran una superficie muy fina (1.11 a 1.67  $\mu\text{m}$ ), por otro lado se ha observado que el EDM en los cerámicos resulta en altas velocidades de maquinado comparado con las técnicas de maquinado convencionales y el mismo caso se repite para obtener acabados de buena calidad.

En recientes los diamantes policristalinos (PCD) han sido maquinados con el proceso de electroerosión por hilo. El PCD es un material muy duro, difícil de darle forma y que solo por medio del esmerilado se le puede trabajar adecuadamente, sin embargo el esmerilado también presenta la desventaja de un rápido desgaste de la herramienta de corte (tiempo de vida muy corto).

Pero empleando electroerosión por hilo se ha encontrado que es más efectivo por el lado de los costos. La calidad de la superficie de la pieza maquinada por electroerosión por hilo es muy buena ya que no hay cambios en el tamaño de grano de la pieza de trabajo.

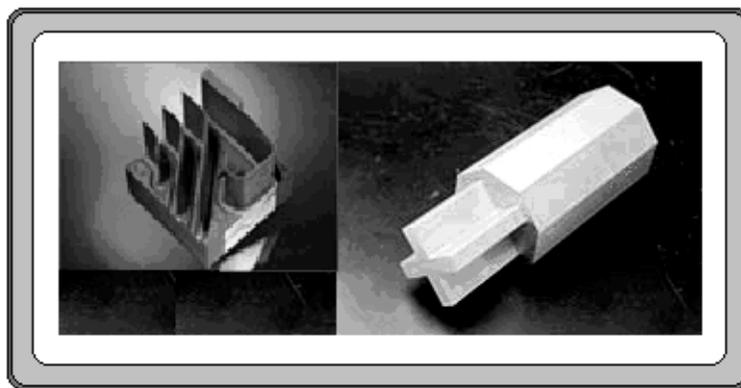


FIGURA 33. Electrodo generados por CAD/CAM.

## CAPITULO 2.

### ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE ELECTROEROSION

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó una máquina de Electroerosión por penetración de la marca Agie Engemaq EDM 440 NC, FIGURA 34. En la FIGURA 35 observamos un esquema representativo de la parte frontal de la máquina, la FIGURA 36 muestra la parte posterior de la máquina.

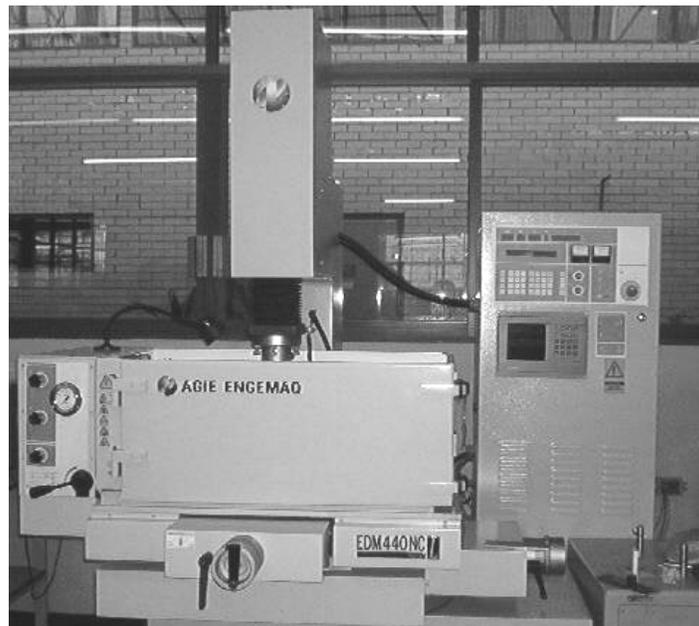


FIGURA 34. Máquina de electroerosión Agie Engemaq EDM 440 NC.

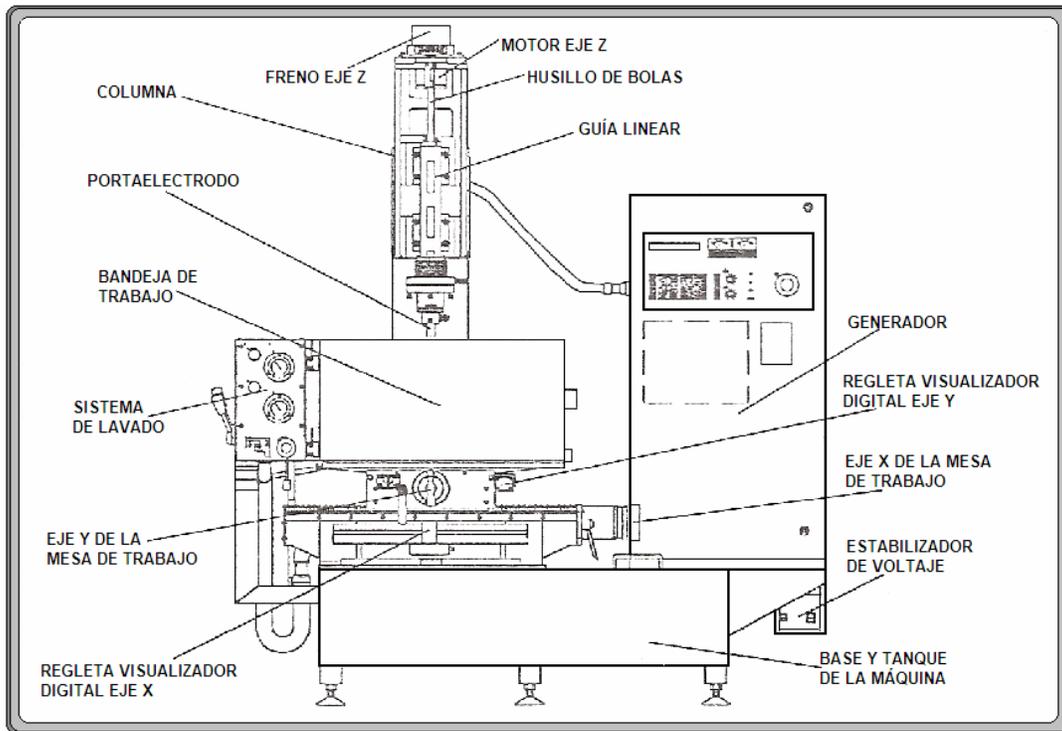


FIGURA 35. Esquema frontal de los componentes más representativos de la Máquina de electroerosión Agie Engemaq EDM 440 NC.

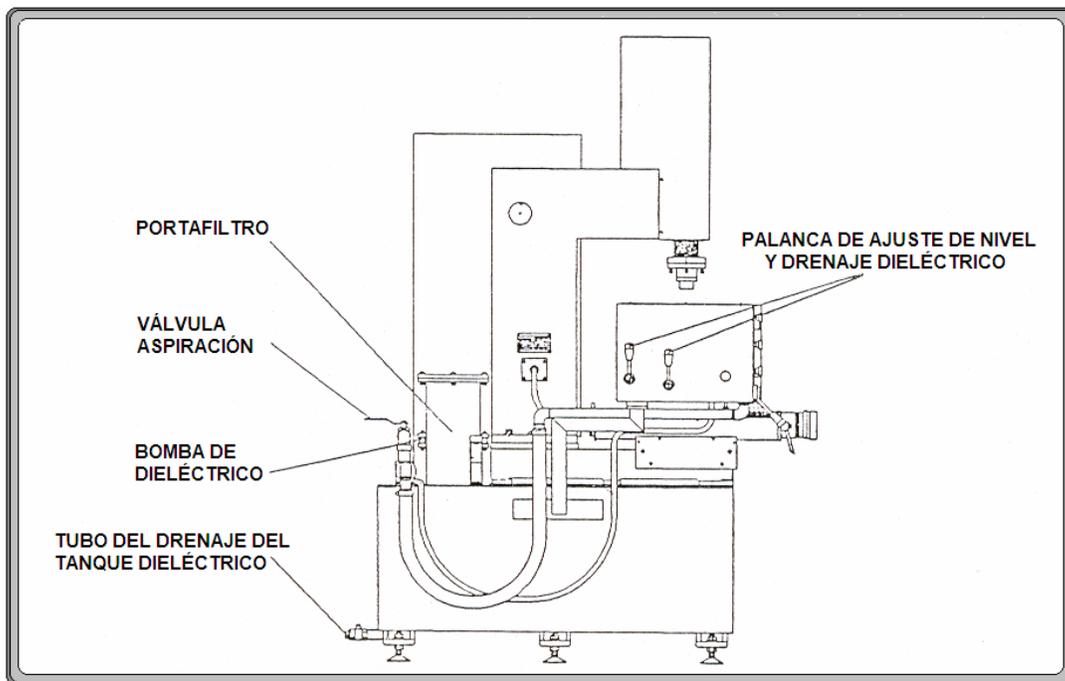


FIGURA 36. Esquema posterior de los componentes más representativos de la Máquina de electroerosión Agie Engemaq EDM 440 NC.

## 2.1 COMPONENTES DE LA MAQUINA AGIE ENGEMAQ EDM 440 NC.

Los componentes correspondientes a la máquina de electroerosión por penetración son variados, desde el panel de control, el controlador o las zonas de trabajo. Para un mejor conocimiento de la máquina se da a continuación una breve explicación de las partes más importantes que conforman el equipo.

### 2.1.1 Panel de control

#### - Pantalla alfanumérica

La pantalla permite al operador examinar la edición de un programa, analizar o seleccionar programas de erosión almacenados en la memoria y saber las causas de las fallas de la máquina.

#### - Pantalla del generador

El generador se enciende activando la palanca del disyuntor principal F1 ubicado en la puerta trasera y la llave pulsadora de emergencia (SI) en el panel del generador.

La pantalla en el panel del generador se enciende y luego aparece el siguiente mensaje: **firmware**, la máquina estará lista para la programación y proceso de erosión, FIGURA 38a. La FIGURA 37 presenta la parte esquemática del panel de control, mostrando los elementos que lo integran.

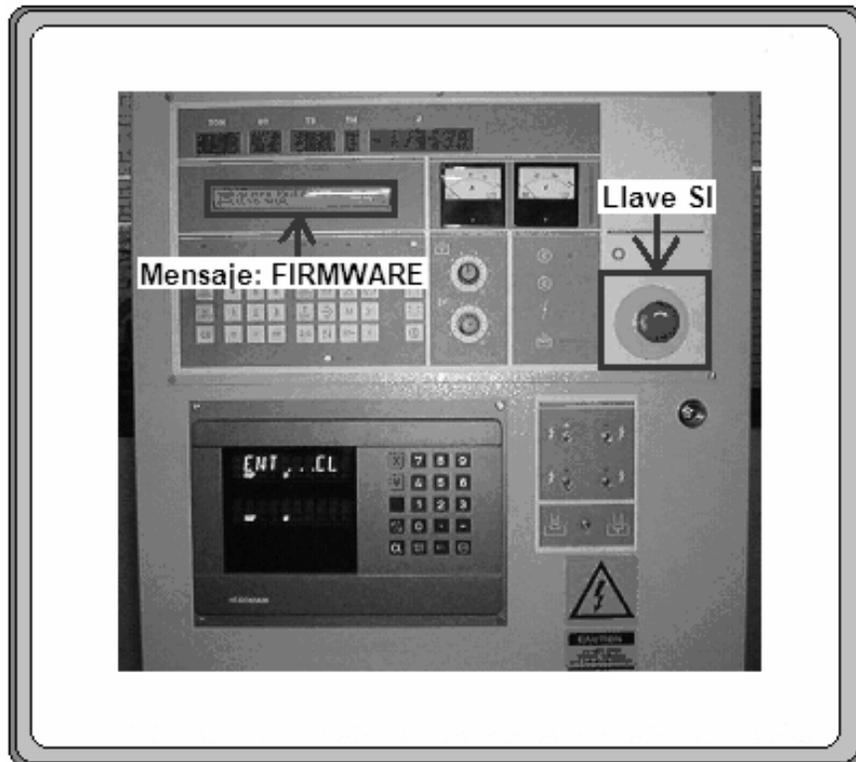


FIGURA 37. Panel de control y generador.

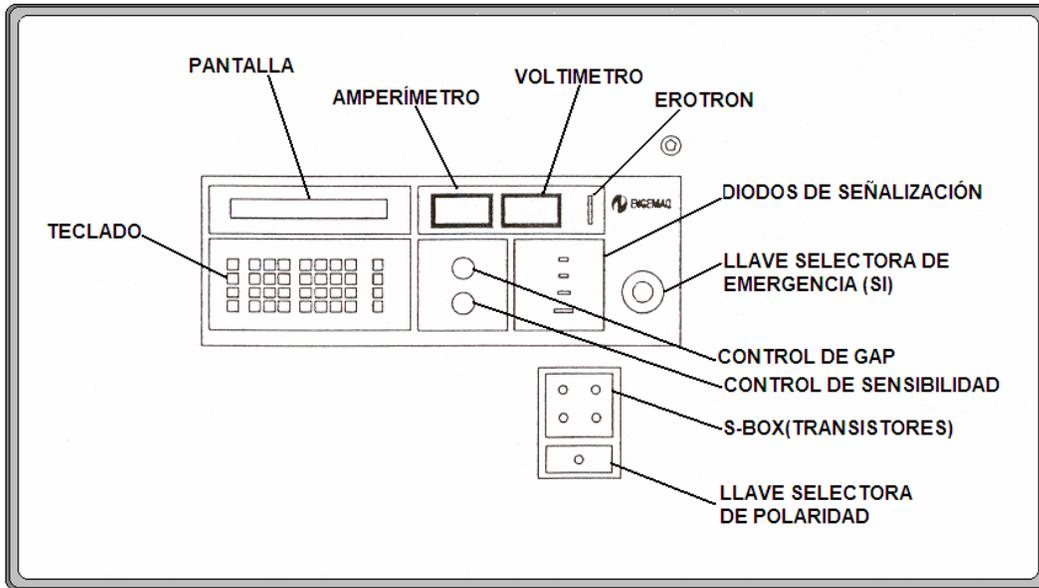


FIGURA 38. Esquema representativo del Panel de control y generador.

### 2.1.2 Llaves selectoras del S-BOX

Las llaves selectoras del S-BOX son usadas individualmente o en conjunto para suministrar energía de erosión adecuada para el mecanizado de metal duro como por ejemplo: carburo de tungsteno u otros metales exóticos de alta dureza. Las llaves son usadas de acuerdo con el área del electrodo (Una llave para aproximadamente  $600\text{mm}^2$ ). Cuando el led correspondiente a cada llave está encendido, indica que el circuito para erosionar el metal está accionando. La figura 39 muestra las cuatro llaves selectoras que contiene el panel de control.

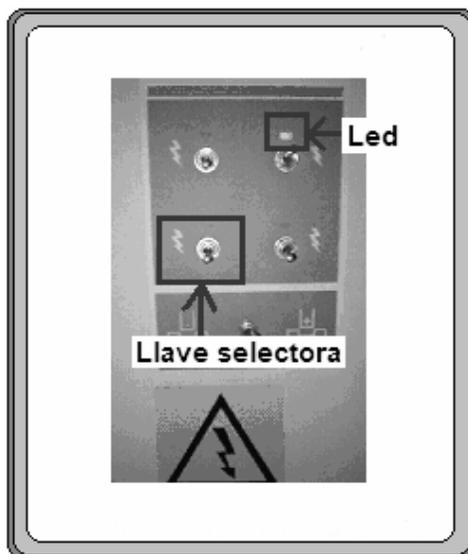


FIGURA 39. Control S-BOX.

### 2.1.3 Sistema de sujeción del portaelectrodo

Los sistemas de sujeción, se pueden dividir en dos grupos importantes, dependiendo de la forma y superficie a sujetar. El primer grupo incluye porta piezas para aquellos elementos que están rodeados por superficies planas e irregulares sobre las cuales actúan las fuerzas sujetadoras. El segundo grupo incluye sistemas de sujeción de piezas que están colocadas y/o sujetas en referencia a superficies redondas. El portaelectrodo como un todo no necesita ser redondo; puede estar rodeado por superficies planas e irregulares, con tal de que las fuerzas sujetadoras actúen sobre o en, y que la colocación sea realizada sobre o en, la superficie redonda. En el caso del sistema de la máquina de EDM 440, el sistema sujetador es para portaelectrodos de superficies redondas, el portaelectrodo es colocado y sujetado en el diámetro interno del mandril, el diámetro máximo aceptable es de aproximadamente 13/16" (20.64 mm), FIGURA 40.

El portaelectrodo se centra sobre el árbol con una exactitud que es el resultado del tamaño real del agujero y del diámetro del árbol. El sistema es accionado manualmente, es decir que la fuerza de sujeción es transmitida a través de un tornillo con una llave de tipo allen, para obtener una sujeción fuerte y segura, aplicando en esta transmisión los principios mecánicos de multiplicación de fuerzas, las leyes de fricción y la resistencia y deformación de materiales. Al ser el portaelectrodo un elemento o pieza rígida y no elástica, los efectos de sujeción quedan preestablecidos a una posición fija y el tornillo queda como un elemento de auto apriete irreversible mecánicamente. Como es un sistema sujetador para piezas redondas la exactitud depende, frecuentemente de la concentricidad y se determina con los elementos de sujeción tales como las mordazas y el tornillo o pasador, así como del cuidado y de la exactitud con que se haya hecho el portaelectrodo, además de considerar la linealidad y perpendicularidad en la colocación del mismo.

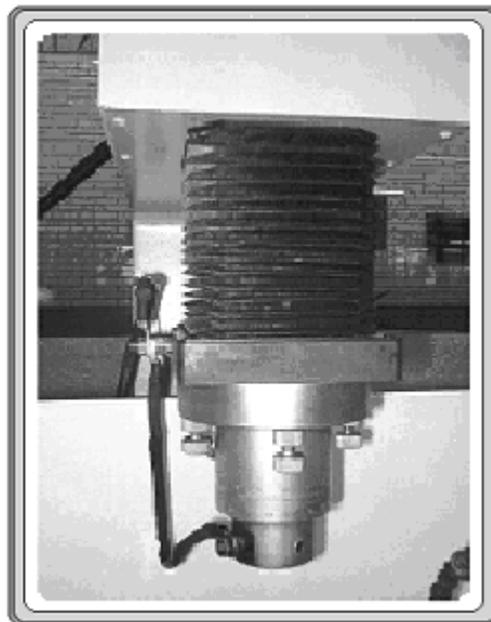


FIGURA 40. Sistema de sujeción del portaelectrodo

### 2.1.4 Sistema de sujeción de la pieza de trabajo.

El método de sujeción de la pieza de trabajo es por medio de un portapiezas magnético colocado en la tina de llenado, justo debajo del sistema de sujeción del portaelectrodo. Estos sistemas son usados frecuentemente, ya que en ocasiones no es práctico sujetar la pieza por presión debido a la posible distorsión y también por la precisión con que puede estar colocada la pieza con respecto al ángulo de trabajo requerido.

Por sus propiedades solo puede sujetar piezas ferrosas, a menos que sujetadores mecánicos intermedios permitan la sujeción de piezas hechas de material no magnético. Está accionado por un electroimán cargado por corriente eléctrica continua. La potencia retenedora obtenible esta relacionada directamente con la fuerza del imán que utiliza y de la cantidad de flujo magnético que pueda ser dirigido a través de la pieza. El plato magnético es de acción rápida, y sujeta una gran superficie de la pieza, esta provisto de una palanca de accionamiento que cierra las líneas de flujo internas o cancela las fuerzas magnéticas. Esta palanca la encontramos de manera separada al plato magnético, pero se interconecta por un sistema de tornillo allen. El uso de porta piezas magnético es destinado para operaciones de trabajo ligeros, como es el caso de la electroerosión. Los platos magnéticos causan una distorsión mínima e imparten algún magnetismo residual a las piezas. Por lo que este debe quitarse por desmagnetización si interfiriese con el funcionamiento apropiado de la pieza.

### 2.1.5 Bandeja de trabajo

La maquina de electroerosión Engemaq tiene una bandeja de trabajo que contiene al fluido dieléctrico. Esta bandeja de trabajo contiene una compuerta de drenaje además de un canalón debajo de la puerta de la bandeja, al cual recoge el goteo de posibles infiltraciones en la puerta de la bandeja y lo lleva de regreso al tanque dieléctrico. La FIGURA 41 nos presenta los elementos que contiene la bandeja de trabajo.

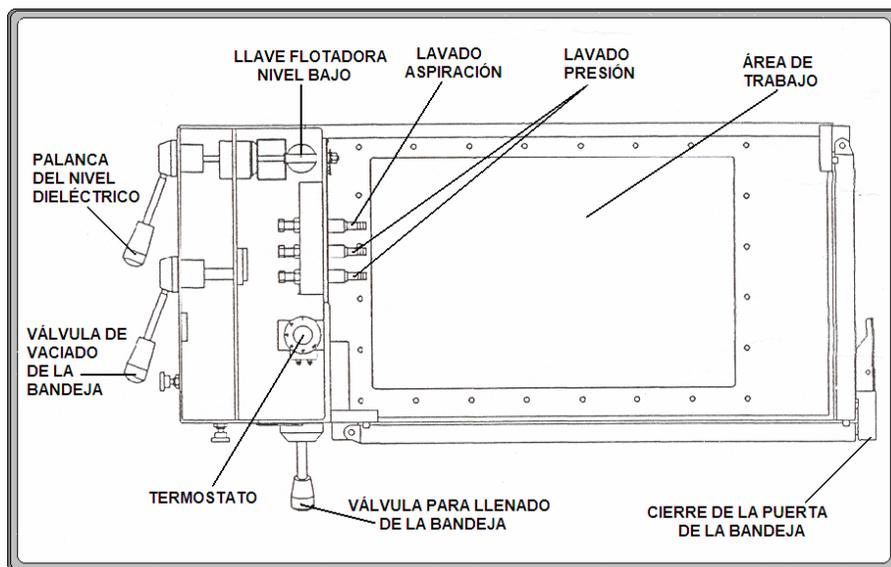


FIGURA 41. Bandeja de trabajo

## 2.1.6 Detectores de temperatura y nivel dieléctrico

La llave flotadora equipada con el detector de nivel y el detector de temperatura están instalados adentro del subconjunto de drenaje de la bandeja de trabajo, ver FIGURA 42. El operador debe ajustar el nivel de dieléctrico por medio de la palanca de control de nivel. El nivel de dieléctrico debe mantenerse por lo mínimo 40 mm arriba de la zona de chispa entre el electrodo y la pieza.

La zona de erosión debe estar sumergida por lo mínimo 40 mm abajo del dieléctrico. Si el nivel de dieléctrico baja del nivel preajustado; la erosión se apaga y el mensaje “NIVEL” aparece en la pantalla.

Si la temperatura del dieléctrico es muy elevada ( $> 50^{\circ}\text{C}$ ); la erosión se apaga y el mensaje “ALTA TEMPERATURA” aparece en la pantalla.

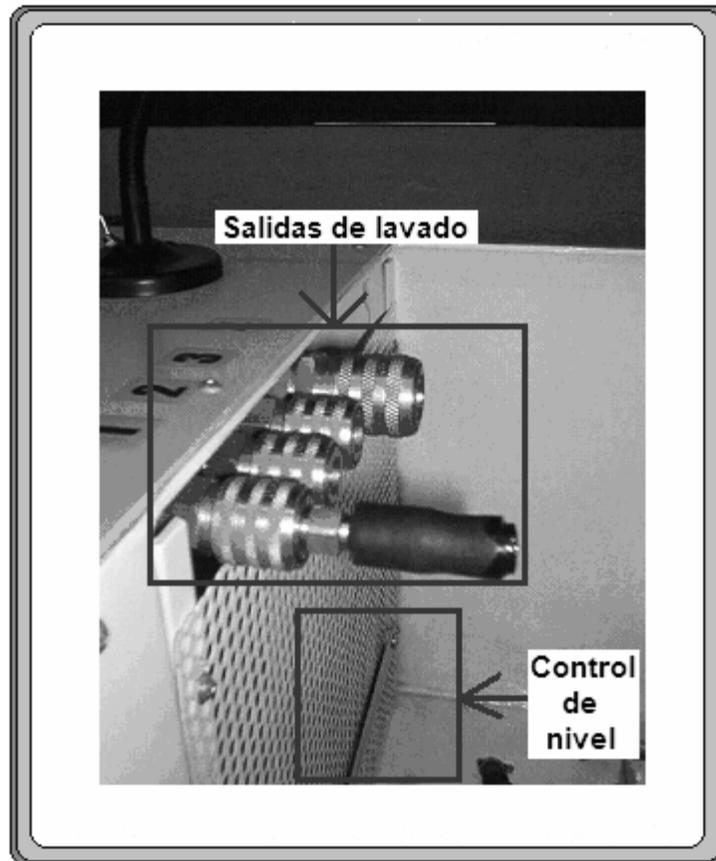


FIGURA 42. Salidas de lavado y control de nivel del dieléctrico.

### 2.1.7 Sistema anticolidión del electrodo

Este sistema tiene la función de proteger al electrodo y la pieza en el caso de una colisión entre electrodo, pieza, los elementos de sujeción o cualquier cosa sobre la mesa que sea conductora de electricidad y por consecuencia de eso tiene conexión eléctrica con la mesa.

Este sistema de protección de colisión se encuentra activo en los movimientos manuales y automáticos. El operador puede desactivar la protección de colisión con la tecla anticolidión de electrodo en el teclado del panel del generador. Esta tecla es útil cuando el operador utiliza un reloj comparador con base magnética en las tareas de alineación del electrodo o de la pieza. Es posible alinear verticalmente o también activar el sistema en X o Y.

### 2.1.8 Bomba del dieléctrico

La bomba del dieléctrico es una parte importante en el sistema que conforma la máquina de electroerosión por penetración, FIGURA 43. Suministra al sistema de trabajo el líquido dieléctrico filtrado con una refrigeración del mismo al ser mezclado. La bomba que trabaja con una velocidad de flujo de 4000 lt/h, suministra el dieléctrico en dos formas; directamente al llenar la tina y por medio de válvulas que pueden ser controladas por el usuario mediante mangueras que se colocan manualmente cerca del área donde se realiza el trabajo de las cargas eléctricas.

Otra consideración a tomar radica en la forma de bombeo ya que cambia la geometría de la cavidad obtenida. Si el líquido se bombea a través y fuera del extremo del electrodo, como es el caso de este trabajo, las partículas se eliminarán y se recogen principalmente en los bordes, bajarán la resistencia dieléctrica, dando por resultado más arcos y como consecuencia los agujeros serán cónicos. Por otro lado, si el líquido es bombeado al vacío en la extremidad del electrodo, los agujeros resultarán rectos.



FIGURA 43. Bomba del fluido dieléctrico.

## 2.1.9 Mesa de coordenadas y sistema de freno

La mesa de coordenadas puede ser desplazada por medio los volantes de los ejes X e Y, ver FIGURA 44. La distancia del desplazamiento de los ejes X e Y puede ser medido con un visualizador digital o directamente en la escala de los aros del volante.

El freno evita el desplazamiento de la mesa de coordenadas durante el proceso de erosión, la FIGURA 45 muestra el volante para el desplazamiento en la coordenada Y, así como, el freno que impide el movimiento de la mesa de coordenadas.

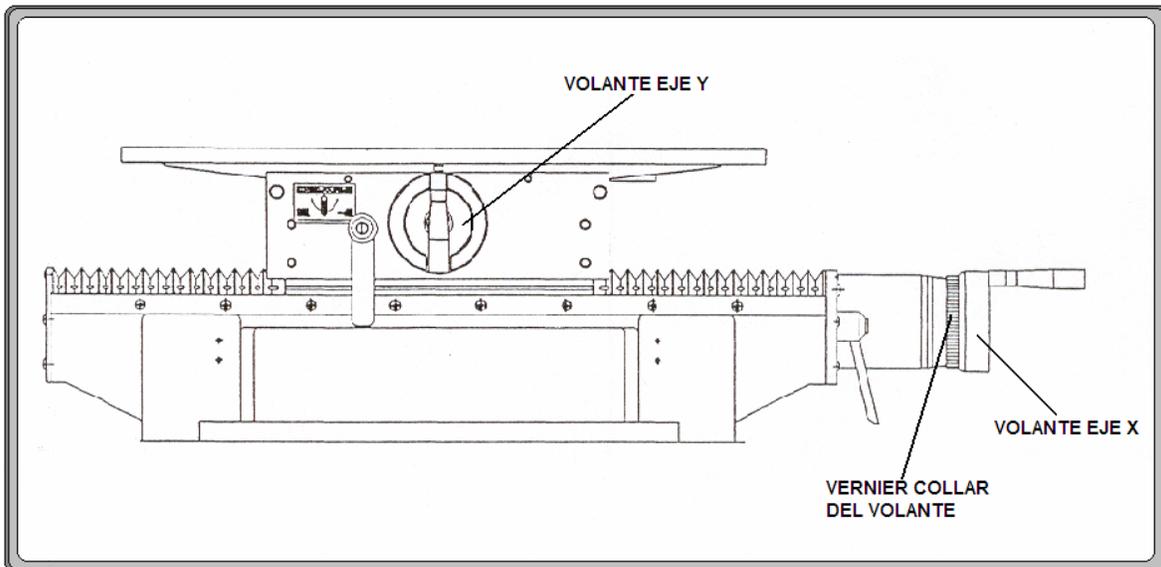


FIGURA 44. Esquema de la mesa de coordenadas. Vista lateral.

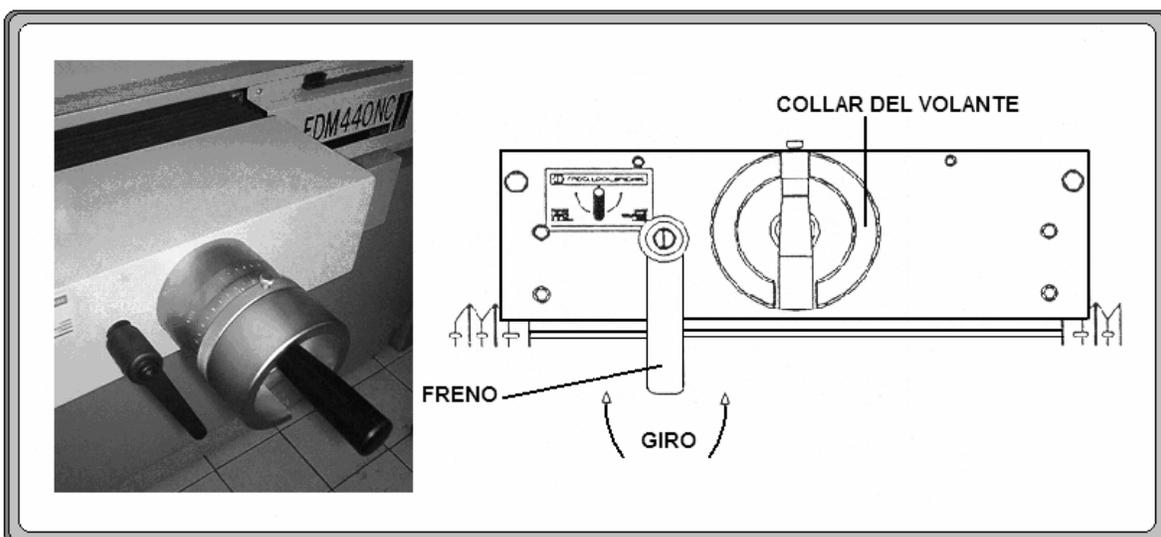


FIGURA 45. Volante del eje Y y freno manual. Vista frontal

### 2.1.10 Llave selectora de polaridad

La llave selectora de polaridad se usa para invertir la polaridad del electrodo. En trabajos normales de erosión, la polaridad del electrodo es positiva y corresponde a la posición 1 de la llave selectora, ver FIGURA 46, así como en algunos trabajos al usar electrodo de grafito o cuando el electrodo es montado en la mesa de trabajo.

Una llave magnética reemplaza la llave selectora manual en los generadores de 80 y 120 Amperios. La llave magnética es activada por medio de una llave palanca ubicada en el panel del generador.

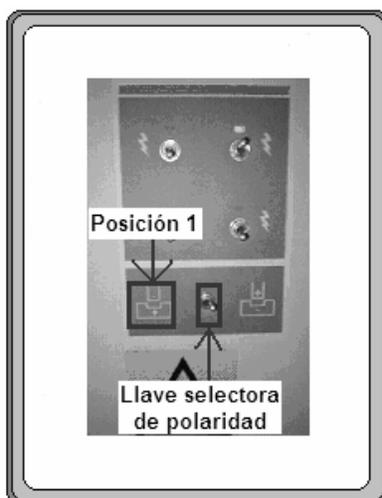


FIGURA 46. Llave selectora de polaridad

### 2.1.11 Llave pulsadora de emergencia

La llave pulsadora de emergencia se usa para desconectar totalmente la energía eléctrica del generador en un caso de emergencia. También se utiliza para encender y apagar la máquina, FIGURA 47.



FIGURA 47. Llave pulsadora de emergencia

### 2.1.12 Voltímetro y Amperímetro

El voltímetro mide el Voltaje del Gap (Voltaje entre electrodo y pieza). Por medio del voltímetro el operador puede controlar visualmente el ajuste del Gap, ver FIGURA 48. El amperímetro mide el flujo de corriente media durante la erosión, permitiendo controlar el ajuste del nivel de corriente de acuerdo con los valores tomados de las tablas de erosión.

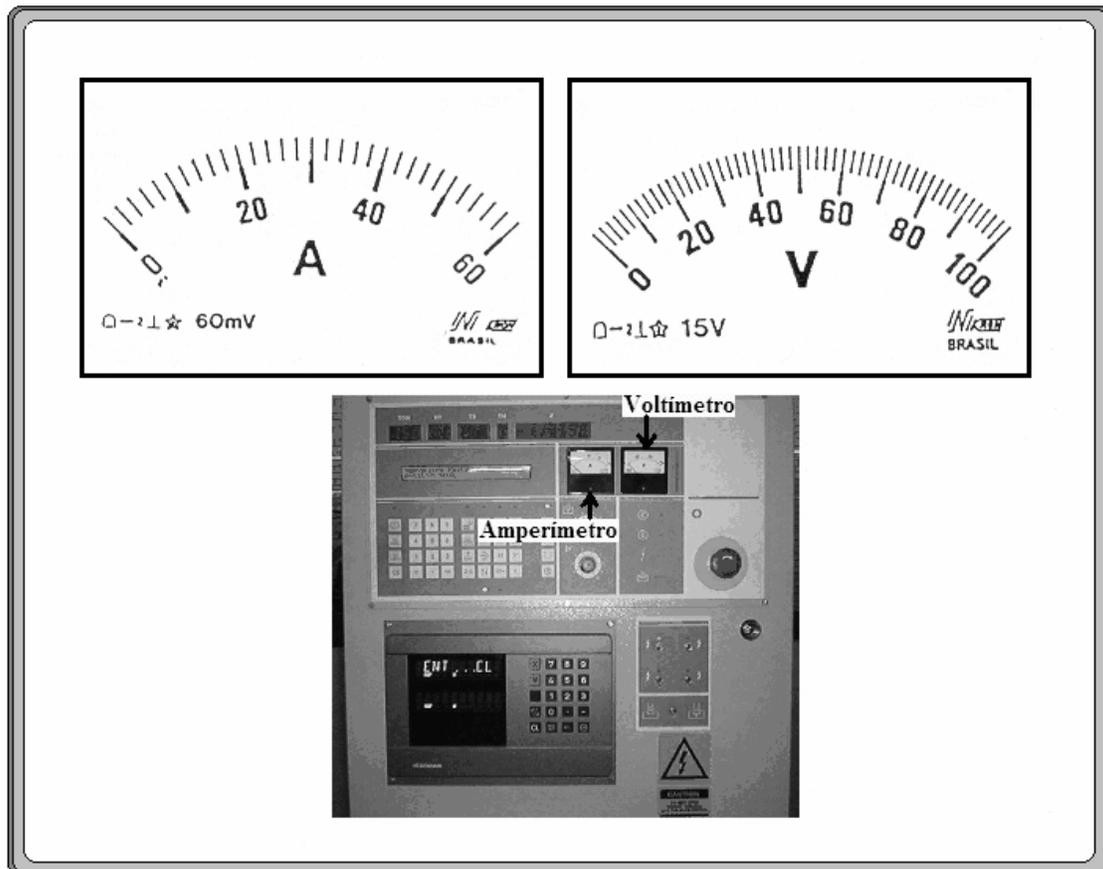


FIGURA 48. Amperímetro y Voltímetro.

### 2.1.13 Control de regulación del Gap y control de regulación de la sensibilidad del servo.

#### Control de regulación del Gap.

Este control regula la distancia vertical entre el electrodo y la pieza (Gap). Un gap más pequeño aumenta el nivel de corriente media. Un gap muy pequeño generalmente resulta en un aumento en el desgaste del electrodo, causa inestabilidad en el sistema y aumenta la posibilidad de arcos destructivos. El operador controla la regulación del gap por medio de la medición del voltaje del gap y flujo de la corriente media durante la erosión.

El control del Gap no funciona cuando el “Modo de operación automático” esta accionado.

### Control de regulación de la sensibilidad del servo.

Este control regula el nivel de sensibilidad o respuesta del sistema servo. Cuanto mas grande es el número en la escala de regulación, más alta es la sensibilidad del servo.



FIGURA 49. Control de regulación del Gap y regulación de la sensibilidad del servo.

### 2.1.14 Diodos de señalización de la fuente de erosión

Los diodos luminosos de la fuente de erosión (FIGURA 50), están ubicados en el frente del panel del generador, indican diferentes funciones, estas son:

- **Señalización del sistema de potencia Standard (figura 50a):** Cuando este diodo luminoso está encendido, indica que el sistema de potencia estándar (100 V) está accionado, esto es, está en uso la corriente de los transistores TS.
- **Señalización del sistema de potencia Hipuls (figura 50b):** Cuando este diodo luminoso está encendido, indica que el sistema de potencia hipuls (250 V) está accionado, esto es, está en uso la corriente de los transistores TH.
- **Señalización de erosión encendida (figura 50c):** Cuando este diodo está encendido, alerta al operador sobre el peligro de alto voltaje que existe entre electrodo y pieza de trabajo.
- **Señalización de la alineación del electrodo-pieza (figura 50d).** Este diodo luminoso en conjunto con la alarma sonora es usado en las tareas de alineación del electrodo y o la pieza de trabajo. El diodo se enciende y la alarma suena cuando el electrodo toca la pieza.

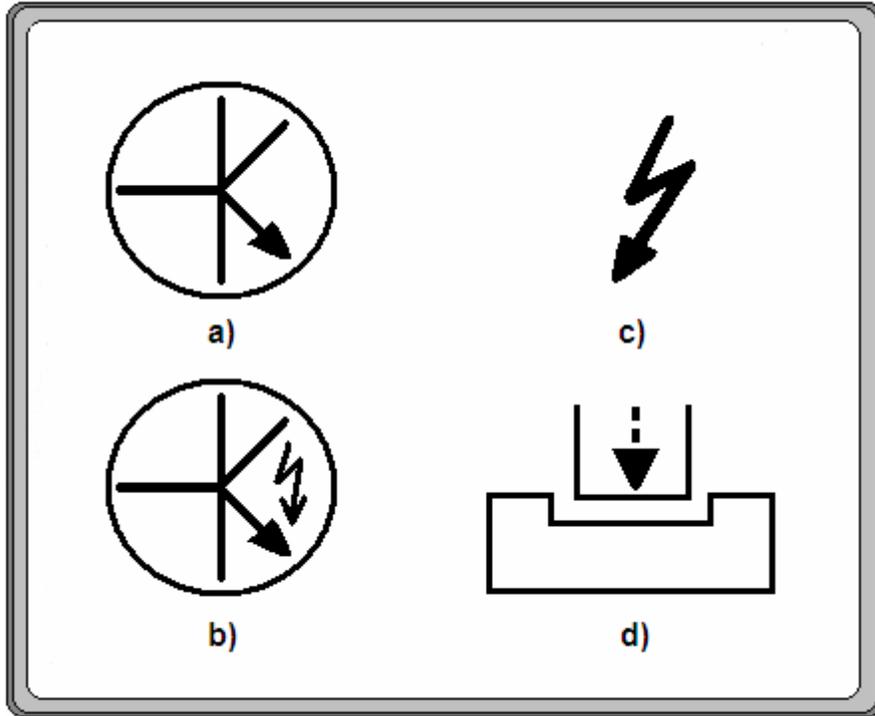


FIGURA 50. Diodos de señalización de la fuente de erosión; a) sistema de potencia Standard, b) sistema de potencia Hi puls, c) erosión encendida, d) alineación del electrodo-pieza.

### 2.1.15 Teclado

El teclado permite al operador editar los parámetros básicos (TON-DT-TS-TH) y las funciones auxiliares de un trabajo de mecanizado por electroerosión, FIGURA 51.

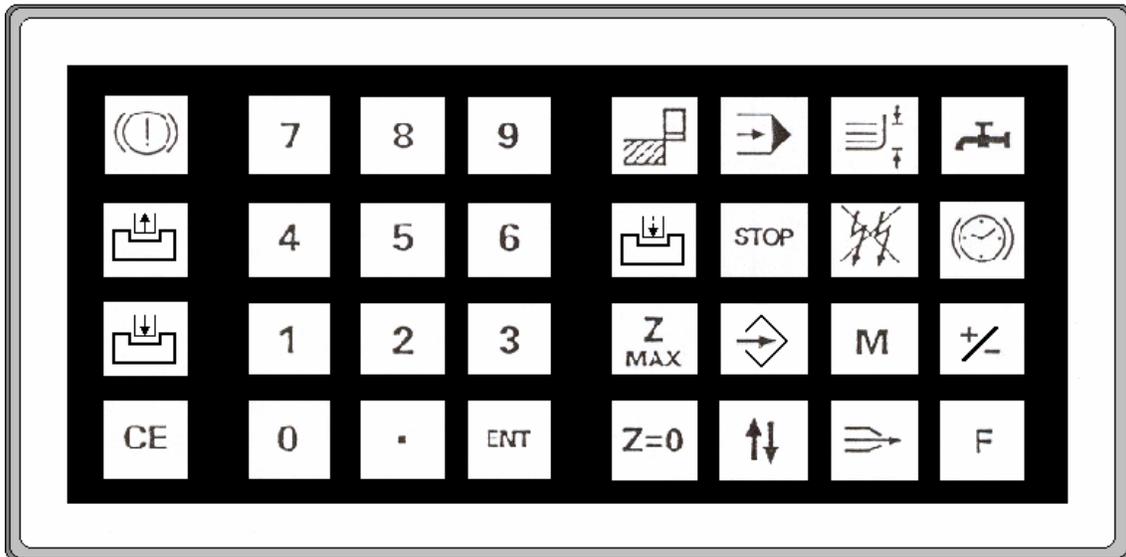


FIGURA 51. Teclado de operación.

## 2.1.16 Diodos para la señalización del panel del generador

Los diodos de señalización del panel del generador (FIGURA 52), nos indican diferentes funciones, las cuales son:

1. SEÑALIZACION DEL OFF FEED: Cuando este diodo amarillo se enciende, indica que el sistema OFF FEED esta accionado.
2. SEÑALIZACION DEL SISTEMA ANTICOLISION: Cuando este diodo amarillo se enciende, indica que el sistema anticolidión no está accionado.
3. SEÑALIZACION DE LA FUENTE DE POTENCIA DE EROSION: Cuando este diodo se enciende, indica que la fuente de potencia de erosión está accionada.
4. SEÑALIZACION LLAVE FLOTADORA INFERIOR DEL NIVEL DIELECTRICO: Cuando este diodo se enciende, indica que el flotador inferior del dieléctrico no está accionado.
5. SEÑALIZACION DE LA BOMBA DEL DIELECTRICO: Cuando este diodo se enciende, indica que la bomba del dieléctrico está trabajando.
6. SEÑALIZACION DEL MODO DE OPERACIÓN:
  - Cuando este diodo está encendido, indica que el “Modo de operación Manual” está accionado.
  - Cuando el diodo está apagado, indica que el “Modo Automático” está accionado.
  - Cuando el diodo está destellando, indica que el “Modo Preprogramado” está accionado.
7. SEÑALIZACIÓN DEL SISTEMA DE EROSION INTERMITENTE: Cuando este diodo está encendido, indica que la erosión intermitente está accionada.
8. SEÑALIZACION DEL LAVADO INTERMITENTE (OPCION): Cuando este diodo está encendido, indica que el lavado intermitente está accionado.

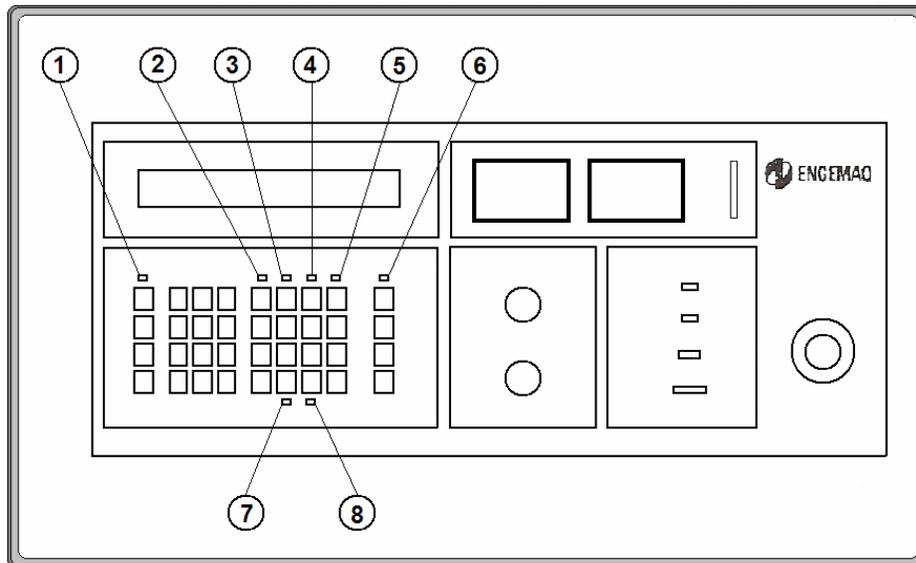


FIGURA 52. Diodos de señalización del panel del generador: 1) Señalización del OFF FEED, 2) Señalización del sistema de anticollisión, 3) Señalización de la fuente de potencia de erosión, 4) Señalización de la llave flotadora inferior del nivel dieléctrico, 5) Señalización de la bomba del dieléctrico, 6) Señalización del modo de operación, 7) Señalización del sistema de erosión intermitente, 8) Señalización del lavado intermitente.

### 2.1.17 Portaelectrodo

Las máquinas de electroerosión requieren de un portaelectrodo de alta precisión con funciones de ajuste de inclinación lateral en las dos direcciones (X,Y) y ajuste giratorio. Para realizar nuestras pruebas se elaboraron portaelectrodos de acero AISI 1018, estos se fabricaron a través de CNC, ver FIGURA 53. Las dimensiones de los portaelectrodos son: 20mm de diámetro y 87mm de largo, tal y como lo muestra la FIGURA 54 sin escala.

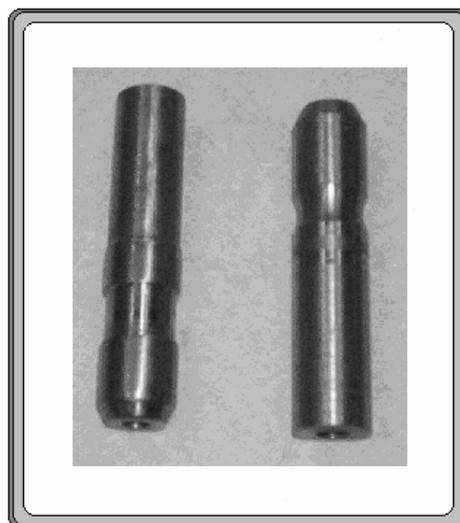


FIGURA 53. Portaelectrodos fabricados por CNC.

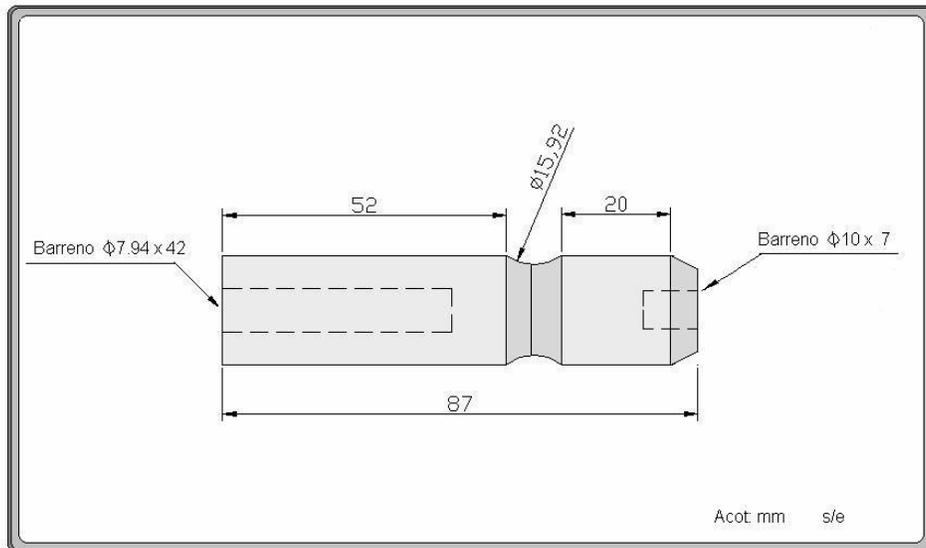


FIGURA 54. Dimensiones de los portaelectrodos.

### 2.1.18 El sistema de movimiento del electrodo

La eficiencia del proceso de electroerosión depende en gran medida de que la distancia entre electrodo y pieza de trabajo sea la apropiada. Por tanto, la misión del sistema de movimiento es posicionar continuamente al electrodo mientras dura el mecanizado. Esto se consigue comparando el voltaje actual con el voltaje teórico.

El error detectado sirve para alimentar un servo amplificador que a su vez pasa la información a un sistema que abre y cierra unas válvulas hidráulicas que permiten el paso de un fluido hidráulico hacia un pistón que en última instancia es quien mueve el brazo sobre el que va montado el electrodo.

El sistema descrito a grandes rasgos, en la práctica, es muy sensible y preciso ya que en condiciones normales de trabajo la distancia que separa electrodo y pieza oscila entre 0.010 a 0.050 mm.

### 2.1.19 Alineación de la pieza de trabajo y electrodo

El montaje y alineación de la pieza de trabajo y del electrodo en su posición exacta es una de las tareas más difíciles en un proceso de mecanizado por electroerosión.

El operador debe escoger la manera mas adecuada de sujetar la pieza de trabajo sobre la mesa de trabajo.

Es muy importante que la conductividad eléctrica entre la pieza y la mesa de trabajo sea buena. Por eso es recomendable limpiar la mesa de trabajo antes de apoyar sobre esta la pieza a trabajar, evitando así una mala conductividad y desplazamiento de la pieza durante el proceso de erosión.

Para este trabajo, se realizó el centrado de la placa de acero AISI 1018 tocando dos puntos. Por las condiciones de operación y características de la máquina de electroerosión utilizada, el centrado se puede llevar a cabo usando un sistema de contacto del que está provista la electroerosionadora. Al hacer contacto el electrodo con un material conductor el sistema emite un sonido el cual avisa el pronto choque de ambas partes. Se tomaron dos puntos de referencia, los cuales son los extremos de la pieza de trabajo, al dividir por dos la longitud dada por los dos puntos se obtiene el centro de la longitud y por consiguiente, el centro de la pieza de trabajo. El primer punto de referencia es tocando el inicio de la placa con el electrodo, ver FIGURA 55. El segundo punto es tocando la parte final de nuestra placa (parte opuesta al primer punto), ver FIGURA 56.



FIGURA 55. Centrado de la pieza primer punto de referencia



FIGURA 56. Centrado de la pieza, segundo punto de referencia

## 2.2 FLUIDO DIELECTRICO

Para realizar este estudio se utilizó un fluido dieléctrico a base de aceite de hidrocarburo EDM. El overcut en EDM es imprevisible cuando se usa el fluido dieléctrico errado. Como antes ya lo mencionamos, el overcut es la distancia por la cual la cavidad del maquinado en la pieza de trabajo excede el tamaño del electrodo.

Este fluido dieléctrico tiene tres funciones básicas:

1. Forma una barrera aislante entre el electrodo y la pieza de trabajo. Para la producción de la chispa, el generador de potencia suministra un alto voltaje que rompe la barrera aislante e inicia el proceso de electro erosión.
2. Produce el enfriamiento de pieza de trabajo así como del electrodo.
3. Efectúa el barrido de las partículas erosionadas hacia fuera del GAP.

Para cumplir estas funciones el dieléctrico presenta las siguientes características.

### 2.2.1 Características del dieléctrico.

- a) Capacidad de aislante
- b) Capacidad de refrigeración
- c) Capacidad de filtraje
- d) Densidad y viscosidad
- e) Transparencia
- f) Resistencia al envejecimiento
- g) Compatibilidad con los componentes del sistema.

#### a) Capacidad de aislante

Para obtener una buena precisión, es importante que la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo sea lo mas pequeña posible sin afectar el proceso de erosión.

#### b) Capacidad de refrigeración

El dieléctrico debe enfriar la pieza de trabajo así como también al electrodo. Independientemente de las propiedades del fluido, es importante que la erosión se realice en una bandeja de trabajo con mucho espacio y que el dieléctrico este circulando constantemente.

#### c) Capacidad de filtraje

Para obtener un buen lavado, el dieléctrico debe mantener las partículas erosionadas en suspensión, por un cierto periodo, para ayudar a su separación por filtración.

#### d) Densidad y viscosidad

Un dieléctrico de alta viscosidad es recomendable para el uso con buenas condiciones de lavado, en mecanizados de desbaste. Esta recomendación tiene una importancia secundaria

y no debería influenciar en la selección del dieléctrico más adecuado, basado en la relación entre corriente de descarga y punto de combustión.

**e) Transparencia**

La buena transparencia es útil permitiendo una inspección visual de la zona de trabajo.

**f) Resistencia al envejecimiento**

El dieléctrico debe mantener sus propiedades por un tiempo tan largo como sea posible y también debe resistir al proceso de oxidación y descomposición.

**g) Compatibilidad con los componentes del sistema.**

Es importante que el dieléctrico sea neutro con respecto a partes del sistema con las cuales entra en contacto (por ejemplo no debe atacar a la pintura, burletes de puertas, etc.)

### **2.2.2 Combustión del dieléctrico.**

Los dieléctricos más utilizados industrialmente son parafinas, aceites minerales ligeros y agua des-ionizada. Todos ellos son relativamente baratos, con baja viscosidad y con temperaturas de inflamación lo suficientemente altas como para que sea seguro trabajar con ellos. Los dieléctricos con un punto de combustión mayor  $> 100^{\circ}\text{C}$  son más adecuados para altas corrientes de descargas.

Un sello de peligro adherido en la máquina advierte que la temperatura del dieléctrico no debe exceder a los  $50^{\circ}\text{C}$ , mientras se esté ejecutando un trabajo de electroerosión.

Existen hoy en día dieléctricos sintéticos de muy alta resistencia con un punto de ebullición de  $213^{\circ}\text{C}$ .

En la industria, la cual ya tiene predestinadas las máquinas de electroerosión para determinados trabajos, se eligen diversos sistemas en donde el procedimiento y el tipo de dieléctrico se rige fundamentalmente de la forma de la pieza a mecanizar, así la temperatura de ebullición del dieléctrico se mantiene controlada dependiendo el tiempo de trabajo y de los parámetros para el mecanizado.

## **2.3 MATERIALES PARA ELECTRODOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS.**

Los primeros electrodos utilizados generalmente eran de grafito debido, por un lado, a sus buenas características como conductor de la corriente eléctrica y por otro, a que es muy fácil de trabajar para obtener geometrías complejas. Estas buenas prestaciones han hecho que junto con el bronce, se hayan mantenido como los electrodos más utilizados en el mecanizado de aceros, siendo reemplazados únicamente por aleaciones de cobre con wolframio en casos muy específicos como lo es en el mecanizado de carburos. El tamaño de las partículas de grafito varía en función del tipo de trabajo a realizar. Para procesos de desbaste se suele trabajar con partículas de  $0.20\text{mm}$ , mientras que en procesos de acabado el tamaño es del orden de  $0.013\text{mm}$ . El latón se usa comúnmente para el mecanizado de

aleaciones de aluminio y la mezcla carbono con wolframio en trabajos de alta precisión y acabado superficial.

En el presente trabajo se utiliza grafito isotrópico del tipo de los grafitos POCO de calidad ultra fina y que está destinado para su uso en la industria de la electroerosión. Este tipo de grafito se utiliza en reactores de fusión experimentales, en válvulas cardíacas artificiales, en naves espaciales, en la industria de las computadoras y en otras tecnologías experimentales y avanzadas, incluyendo algunas que son extremadamente exigentes y en las cuales sólo el grafito POCO puede usarse.

En el caso del cobre, se consideró el uso del cobre electrolítico, que es un tipo de cobre también para la industria de la electroerosión, su característica especial en cuanto a los demás cobres es su grado de pureza, el cual ofrece un 99.9 por ciento de contenido de cobre y solo un 0.1 por ciento de impurezas. Los electrodos de bronce se utilizan en aplicaciones que requieren un buen acabado superficial y altos ritmos de producción.

En las pruebas realizadas se utilizó cobre electrolítico 110 ASTM en barra redonda de tipo maquinable. El cobre electrolítico es un metal comercialmente puro. Es relativamente suave, de alta conductividad, refinado por descomposición electrolítica con un contenido de oxígeno bajo y controlado. El cobre también es uno de los metales nobles. Sus principales propiedades son: Excelente conductividad eléctrica, una de las más altas de todos los elementos, que permite aplicaciones en electricidad y electrónica, excelente conductividad térmica que permite las aplicaciones relacionadas con los equipos termodinámicos, es muy maleable, resistente a la corrosión, antimagnético, antichispa y con propiedades criogénicas.

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron electrodos cilíndricos de grafito electrolítico y de cobre electrolítico ambos en forma de barra redonda de 1 pulgada de diámetro, tal y como lo muestra la FIGURA 57. La longitud de cada electrodo varía con respecto a cada prueba realizada.



FIGURA 57. Eléctrodos cilíndricos de grafito de 1 pulgada de diámetro.

## 2.4 MATERIALES DE PROCESO.

Por lo general se utilizan metales apropiados para el trabajo de electroerosión, que sean económicos y alcancen los niveles de calidad y propiedades requeridas.

En el proceso de electroerosión de este trabajo se usaron para los electrodos cobre electrolítico ASTM-110 y grafito POCO. Para la pieza de trabajo el material empleado fue acero de bajo carbono AISI-1018.

Cabe señalar que los materiales utilizados como piezas de trabajo son considerados debido a características especiales como una buena conducción térmica, por su capacidad a ser trabajados, por su dureza, su punto de fusión, etc. Todo ello de acuerdo a las necesidades y condiciones de trabajo o como objetivo final de un proceso.

A continuación se dan algunos valores de puntos de fusión para materiales empleados como piezas de trabajo.

TABLA 3. Comparación de puntos de fusión de materiales utilizados en EDM

<b>Materiales empleados</b>	<b>Temperaturas de fusión</b>
Acero de alto carbono	1370°C (2500°F)
Acero medio carbono	1430°C (2600°F)

Acero inoxidable	1430°C (2600°F)
<b>Acero de bajo carbono</b>	<b>1510°C (2750°F)</b>
Aluminio	620°-650°C (1150°-1200°F)
Bronce	880°-920°C (1620°-1680°F)
<b>Cobre electrolítico</b>	<b>1083°C (2013°F)</b>
Cobre	1050°C (1980°F)
Cinc	420°C (787°F)
<b>Grafito</b>	<b>3500°C (6332°F)</b>
Hierro forjado	1593°C (2900°F)
Hierro fundido	1220°C (2250°F)
Latón	930°-980°C (1700°-1800°F)
Manganeso	1260°C (2300°F)
Metal monel	1340°C (2450°F)
Molibdeno	2625°C (4757°F)
Níquel	1450°C (2640°F)
Plata	960°C (1760°F)
Titanio	1820°C (3308°F)
Tungsteno	3396°C (6170°F)

## CAPITULO 3.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para lograr el objetivo del trabajo, se realizaron pruebas con la máquina de electroerosión Agie Engemag EDM 440 NC, la cual sirvió como base en el estudio del acero AISI 1018, los electrodos seleccionados para realizar los experimentos forman parte de los resultados que serán comparados y analizados posteriormente, la organización de dichos resultados se ha agrupado en tablas para entender los diferentes parámetros y variantes que se usaron.



FIGURA 58. Preparación de una prueba con el electrodo de grafito.

### 3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el proceso de electroerosión se usó una máquina Agie Engemag EDM 440 NC. Se utilizaron placas de acero AISI 1018 para las probetas. Para cumplir el objetivo del presente trabajo, se considera trabajar con dos materiales distintos para los electrodos, el material convenido en primer lugar es el cobre electrolítico el cual difiere del cobre común por su alto contenido de pureza, este material es de uso común y su distribución es generalmente garantizada, su precio es relativamente bajo y su duración es alta, según se comprobará también en este estudio. El segundo material es el grafito POCO, está destinado a la fabricación rápida y de muy buena calidad de electrodos generadores de cavidades, su precio es mas elevado al del cobre electrolítico y también se garantiza su obtención en formas de barras y en placas.

Los electrodos utilizados tienen 1 pulgada de diámetro, en barras tanto de cobre electrolítico como de grafito. Los portaelectrodos se fabricaron en un centro de maquinado Emco 400 por medio de un programa de control numérico computarizado (CNC) en un acero AISI 1018 y sus cavidades internas se ejecutaron con un torno convencional, además de la adecuación de una rosca interna generada de manera tradicional con machuelos y cuyo uso es el de poder sujetar el electrodo de cobre.

Se determinó el tipo de dureza en un Microdurómetro Leitz Wetzlar 8068 para las zonas próximas a la huella (de manera microscópica) y para garantizar si hubo cambio de dureza en el entorno de la huella, se utilizó un Durómetro en la escala Rockwell B. Se hicieron pruebas de rugosidad a la superficie electroerosionada con un rugosímetro electromecánico Mitutoyo, modelo SURFTEST – 402 y se determinó el tamaño del diámetro con un vernier Digital marca Mitutoyo.

Como parte inicial se obtuvieron electrodos de grafito electrolítico y de cobre electrolítico de 2.54 cm. (1 pulgada) de diámetro, ambos con una longitud de una pulgada aproximadamente. Se inicializa el proceso de electroerosión para obtener diferentes grados de rugosidad que se aproximen a un microacabado, basándose en unas tablas de electroerosión del manual proporcionado por Engemag (ver TABLA 4). Para cada tipo de prueba se hacen variar los parámetros de TS, TH, TON, DT y Gap, manteniendo el nivel de Sensibilidad del servomotor constante tal y como es sugerido en las tablas antes mencionadas.

Para cada uno de los eventos efectuados se toman las mediciones de longitud inicial y final del electrodo, así como el tiempo en que tarda en efectuarse el proceso de electroerosión. Al ser electrodos redondos se obtiene una huella circular que por medio de la programación propia de la máquina, se hacen homogéneas en su profundidad. Para un buen análisis final se establece la longitud de cavidad máxima de todas las pruebas, esta profundidad es entonces, de 2 mm.

Las huellas establecidas se consideraron en una placa de acero de 160 mm de largo y 57 mm de ancho, con un espesor estimado en  $\frac{1}{4}$  de pulgada (6.35 mm aproximadamente), se distribuyeron cinco eventos con los mismos parámetros a lo largo de cada placa, a fin de obtener las suficientes pruebas para un correcto análisis.

### 3.2 PARÁMETROS DE ENTRADA

#### Tiempo de mecanizado:

El tiempo de mecanizado puede variar de acuerdo a los parámetros de entrada, se puede calcular utilizando la siguiente fórmula proporcionada por el fabricante:

$$T = \frac{\text{Área electrodo}(\text{mm}^2) \times \text{Profundidad cavidad}(\text{mm})}{V_w (\text{arranque material en mm}^3/\text{seg})}$$

Para generar el tamaño del pulso de descarga, intervienen los parámetros de entrada de la máquina.

Los parámetros de entrada más representativos en una máquina de electroerosión son: TS, TH, TON, DT, Zmáx, Gap y Sensibilidad

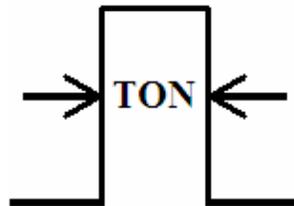
#### TS y TH:

El número de TS (transistor estándar) y TH (transistor hi puls) establece el nivel de energía de la descarga eléctrica.

$$TS = \frac{A (\text{cm}^2) \times \text{DENSIDAD DE CORRIENTE}}{3}$$

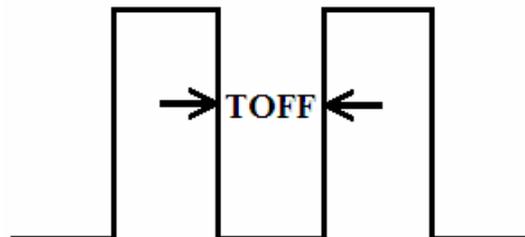
#### Duración del pulso (TON):

Es el tiempo de duración de la descarga, se mide en microsegundos.



#### Régimen de trabajo – Duty Cycle (DT):

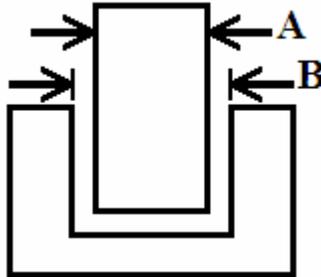
El régimen de trabajo (DT) es el porcentaje de TON con relación a la suma del tiempo de descarga (TON) y del tiempo de pausa (TOFF) de un trabajo de erosión. Cuanto más grande es el número del DT, más pequeño es el tiempo de pausa (TOFF) entre descargas.



$$DT\% = \frac{TON (\mu s)}{(TON + TOFF) (\mu s)} \times 100$$

### Control de regulación del Gap:

Se determina Gap a la distancia que existe entre el electrodo y la pieza de trabajo. Al aplicar un Gap pequeño aumenta el nivel de corriente media. Un Gap muy pequeño generalmente resulta en un aumento en el desgaste del electrodo, causa inestabilidad en el sistema y aumenta la posibilidad de arcos destructivos. El operador controla la regulación del Gap por medio de la medición de su voltaje y el flujo de la corriente media durante la erosión.



$$2GS = B - A$$

### Zmáx:

Este parámetro permite ingresar la profundidad de la cavidad (en décimas de mm) que se desea programar. El valor del Zmáx es menor a la profundidad de la cavidad terminada debido al efecto del Gap.

### Control de regulación de la sensibilidad del servo.

Cuanto más grande es el número en la escala de regulación, más alta es la sensibilidad del servomotor.

### Corriente de descarga (I):

La corriente de descarga (I), determina la calidad y la productividad del proceso de erosión, está relacionada con las condiciones de operación existentes en el Gap. Al comenzar con la erosión las condiciones del Gap se encuentran en un estado de constante transformación. El fluido dieléctrico estabiliza estas condiciones, permitiendo el intercambio de calor y equilibrio térmico.

En este trabajo se hizo una selección de la corriente de descarga tomando en cuenta lo siguiente:

- Características térmicas del electrodo.
- Condiciones del Gap.
- Área de contacto entre el electrodo y la pieza de trabajo (área frontal del electrodo).
- Los diferentes acabados superficiales al variar los parámetros de entrada. Para las pruebas se usaron los diferentes parámetros tal y como lo muestra la Tabla 4. Programaciones de EDM, parámetros de entrada para el mecanizado.

El número de TS (transistor estándar) o el TH (transistor hi puls) establecen el nivel de energía de la descarga eléctrica.

La densidad de la corriente media está dada por:

$$\begin{aligned}1TS &= 3\text{Amp} \\1TH &= 0.8\text{Amp}\end{aligned}$$

### 3.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.3.1 Tiempo de mecanizado y longitud calibrada del electrodo

Los tiempos en que se realizaron las pruebas son fundamentales para obtener los datos y lograr una comparación real entre los diferentes parámetros utilizados con los dos tipos de material de los electrodos.

Con estos resultados se logra saber la variación entre cada uno de los parámetros entendiendo que al irlos modificando se dan resultados muy significativos. De esta forma se comprueba que los diferentes niveles de maquinado con los que se pueden trabajar son distintos y su aplicación según los requerimientos de cada trabajo se logrará entender de una manera directa y se predecirá correctamente los tiempos en que se trabajará la pieza deseada según los parámetros escogidos. Si bien el tiempo de mecanizado cambia según los valores usados, también se demostrará que todos los resultados y características son diferentes y van ligados conjuntamente con los parámetros de fabricación.

La importancia de medir como primer resultado el tiempo, da la facilidad de comprender los cambios de trabajo que se efectúan en la placa metálica (pieza de trabajo) en la que se realizaron las pruebas al variar los parámetros de entrada. Los resultados obtenidos se muestran a partir de la TABLA 5 y hasta la TABLA 16.

Los parámetros se mantuvieron constantes durante cinco experimentos, a esta serie de experimentos se le denominó **prueba** y a dichos experimentos se les llamó **eventos**. Para cada variación de parámetros se realizó una prueba pero al tener dos electrodos, se hizo una prueba para cada uno de estos. Las pruebas se hicieron siguiendo los diferentes parámetros establecidos en la TABLA 4, teniendo como resultado doce diferentes tablas correspondientes a la experimentación realizada.

Para cada prueba se midió la longitud de desgaste que se produce durante el proceso de erosión. La longitud que se desgastó durante el proceso de electroerosión fue variable, y está directamente relacionada con los parámetros de trabajo y del tiempo de maquinado. La importancia de saber cuánto se desgasta el electrodo radica principalmente en tener los datos necesarios para poder predecir el desgaste que sufrirá un electrodo con forma simple al ponerlo a trabajar con un acero tipo AISI 1018 utilizado, esto es justificable debido a la importancia que tiene el electrodo de conservar sus características, dado que éste puede servir como un electrodo de forma para la realización de cavidades, cuya exactitudes son sumamente importantes en el proceso de electroerosión.

La forma de medir la longitud desgastada del electrodo se hizo al tomar la diferencia de longitudes. Se tomó la longitud del electrodo antes y después del proceso, obteniendo un incremento en el desgaste. La realización de la prueba se hizo con la ayuda de un vernier digital y las medidas se realizaron sin retirar del portaelectrodo la pieza en cuestión. El mismo método de obtención del desgaste se realizó en ambos electrodos y los resultados aparecen a partir de la TABLA 5 y hasta la TABLA 16.

TABLA 4. Programaciones de la maquina EDM, parámetros de entrada para el mecanizado.

<b>Prueba</b>	<b>TS</b>	<b>TH</b>	<b>TON</b>	<b>DT</b>	<b>GAP</b>
1	0.5	0	20	35	5
2	1	0	50	55	5
3	2	0	100	55	5
4	3	0	150	60	5
5	4	0	200	65	5
6	6	0	300	75	5

TABLA 5. Resultados del mecanizado, **prueba 1** utilizando el electrodo de **Grafito**, a una profundidad de 2mm. TS = 0.5, TH = 0, TON = 20, DT = 35 Y GAP = 5, Sensibilidad 8.

<b>Evento</b>	<b>Voltaje (Volts)</b>	<b>Corriente (Amp)</b>	<b>Desgaste del electrodo.(mm)</b>	<b>Tiempo de mecanizado(min)</b>
1	40-170	0-2	0.61	320
2	40-170	0-2	0.74	335
3	40-170	0-2	0.66	338
4	40-170	0-2	0.62	336
5	40-170	0-2	0.78	326

TABLA 6. Resultados del mecanizado, **prueba 2** utilizando el electrodo de **Grafito**, a una profundidad de 2mm. TS = 1, TH = 0, TON = 50, DT = 55 Y GAP =5, Sensibilidad 8.

<b>Evento</b>	<b>Voltaje (Volts)</b>	<b>Corriente (Amp)</b>	<b>Desgaste del electrodo.(mm)</b>	<b>Tiempo de maquinado(min)</b>
1	40-170	0-3	0.66	88,31
2	40-170	0-3	0.19	79,14
3	40-170	0-3	0.61	83,13
4	40-170	0-3	0.99	80,45
5	40-170	0-3	0.56	87,10

TABLA 7. Resultados del mecanizado, **prueba 3** utilizando el electrodo de **Grafito**, a una profundidad de 2mm. TS = 2, TH = 0, TON = 100, DT = 55 Y GAP = 5, Sensibilidad 8.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-3	0.6	34,16
2	40-170	0-3	0.54	34,37
3	40-170	0-3	0.56	34,31
4	40-170	0-3	0.53	34,30
5	40-170	0-3	0.49	35,14

TABLA 8. Resultados del mecanizado, **prueba 4** utilizando el electrodo de **Grafito**, a una profundidad de 2mm. TS = 3, TH = 0, TON = 150, DT = 60 Y GAP = 5, Sensibilidad 8.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-3	0.35	22,13
2	40-170	0-3	0.35	20,30
3	40-170	0-3	0.43	22,40
4	40-170	0-3	0.40	21,10
5	40-170	0-3	0.35	20,49

TABLA 9. Resultados del mecanizado, **prueba 5** utilizando el electrodo de **Grafito**, a una profundidad de 2mm. TS = 4, TH = 0, TON = 200, DT = 65 Y GAP = 5, Sensibilidad 8.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-8	0.39	13,50
2	40-170	0-8	0.47	12,31
3	40-170	0-8	0.35	12,23
4	40-170	0-8	0.38	12,04
5	40-170	0-8	0.45	12,03

TABLA 10. Resultados del mecanizado, **prueba 6** utilizando el electrodo de **Grafito**, a una profundidad de 2mm. TS = 6, TH = 0, TON = 300, DT = 75 Y GAP = 5, Sensibilidad 8.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	30-170	0-12	0.30	5,20
2	30-170	0-12	0.35	5,20
3	30-170	0-12	0.36	5,24
4	30-170	0-12	0.35	5,22
5	30-170	0-12	0.32	5,18

TABLA 11. Resultados del mecanizado, **prueba 1** utilizando electrodo de **Cobre electrolítico**, profundidad de 2mm. TS = 0.5, TH = 0, TON = 20, DT = 35 Y GAP = 5.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de mecanizado.(min)
1	30-170	0-1	1.35	1115
2	30-170	0-1	1.02	1090
3	30-170	0-1	1.98	1124
4	30-170	0-1	1.20	1350
5	30-150	0-1	1.52	1312

TABLA 12. Resultados del mecanizado, **prueba 2** utilizando el electrodo de **Cobre electrolítico** a una profundidad de 2mm. TS = 1, TH = 0, TON = 50, DT = 55 Y GAP = 5.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de mecanizado(min)
1	40-170	0-2	0.03	1620
2	40-170	0-2	0.50	330
3	40-170	0-2	0.86	368
4	40-170	0-2	0.88	367
5	40-170	0-2	1.30	385

TABLA 13. Resultados del mecanizado, **prueba 3** utilizando el electrodo de **Cobre electrolítico** a una profundidad de 2mm. TS = 2, TH = 0, TON = 100, DT = 55 Y GAP = 5.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-3	0.07	170
2	40-170	0-3	0.03	163
3	40-170	0-3	0.03	161
4	40-170	0-3	0.03	151
5	40-170	0-3	0.02	165

TABLA 14. Resultados del mecanizado, **prueba 4** utilizando el electrodo de **Cobre electrolítico** a una profundidad de 2mm. TS = 3, TH = 0, TON = 150, DT = 60 Y GAP = 5.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-4	0.20	90
2	40-170	0-4	0.06	81.6
3	40-170	0-4	0.02	85.2
4	40-170	0-4	0.02	76.2
5	40-170	0-4	0.12	81

TABLA 15. Resultados del mecanizado, **prueba 5** utilizando el electrodo de **Cobre electrolítico** a una profundidad de 2mm. TS = 4, TH = 0, TON = 200, DT = 65 Y GAP = 5.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-5	0.11	43,17
2	40-170	0-5	0.04	39,28
3	40-170	0-5	0.02	39,40
4	40-170	0-5	0.02	41,50
5	40-170	0-5	0.10	41,00

TABLA 16. Resultados del mecanizado, **prueba 6** utilizando el electrodo de **Cobre electrolítico** a una profundidad de 2mm. TS = 6, TH = 0, TON = 300, DT = 75 Y GAP = 5.

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado(min)
1	40-170	0-9	0.10	30,50
2	40-170	0-9	0.04	31,08
3	40-170	0-9	0.05	20,06
4	40-170	0-9	0.03	18,90
5	40-170	0-9	0.10	20.06

### 3.3.2 Diámetro de la superficie electroerosionada

Para cada prueba efectuada con el proceso de electroerosión, se obtuvo en la pieza de trabajo una cavidad cilíndrica a través de la aplicación controlada de descargas eléctricas de alta frecuencia para vaporizar o fundir el material del acero AISI 1018. Los parámetros preestablecidos para cada prueba permiten controlar las descargas eléctricas consecuencia de pulsos controlados de corriente directa entre el electrodo-herramienta (generalmente negativo) y el material eléctricamente conductor de la pieza de trabajo (generalmente positivo).

La vaporización instantánea produce una burbuja de alta presión que se expande radialmente en el dieléctrico. Al interrumpirse la descarga, el metal es expulsado y deja un pequeño cráter esférico en la pieza de trabajo y se vuelve a solidificar como glóbulos en suspensión en el dieléctrico, repitiéndose el proceso miles de veces.

La cavidad cilíndrica que se obtiene, presenta una conicidad con diferentes características para cada tipo de electrodo. Esta conicidad se presenta por generarse dos tipos de diámetros: en la conicidad el diámetro menor que se genera es de dimensiones similares al del electrodo-herramienta, el diámetro mayor corresponde a la dimensión de la cavidad generada, tal y como lo muestra la FIGURA 59.

La importancia del diámetro final radica principalmente en la seguridad de obtener cavidades lo mas exacto a las dimensiones de la cavidad original, dentro de los procesos de producción es indispensable que las tolerancias en una pieza elaborada sean cada vez menores, es ahí donde la electroerosión brinda su mejor ventaja sobre los medios convencionales de maquinado, ya que se ha demostrado que las piezas elaboradas por EDM tienen mejores características de maquinado, incluyendo sus dimensiones, que por otros medios como lo es el MAV (maquinado de alta velocidad),

Por medio de este estudio también se pretende establecer que los parámetros de maquinado son directamente proporcionales a las características geométricas de la pieza maquinada, ya que mientras los parámetros se varían, los diámetros obtenidos también se modifican, por lo que al obtener diámetros con tolerancias mayores, los parámetros son establecidos de manera diferente a cuando sucede lo contrario.

La TABLA 17 presenta la variación de las diferencias del diámetro para cada una de las 6 pruebas con el electrodo de grafito. La TABLA 18 presenta de igual forma las diferencias del diámetro para cada una de las 6 pruebas con el electrodo de cobre electrolítico. Cada prueba consta de 5 cavidades (hechas sobre la misma placa), elaboradas con distintos parámetros, las cavidades presentan dos diferentes diámetros: uno interior y otro exterior, tal y como lo muestra la FIGURA 59, las medidas de los diámetros en cada probeta se hicieron con un vernier digital marca mituyoyo.

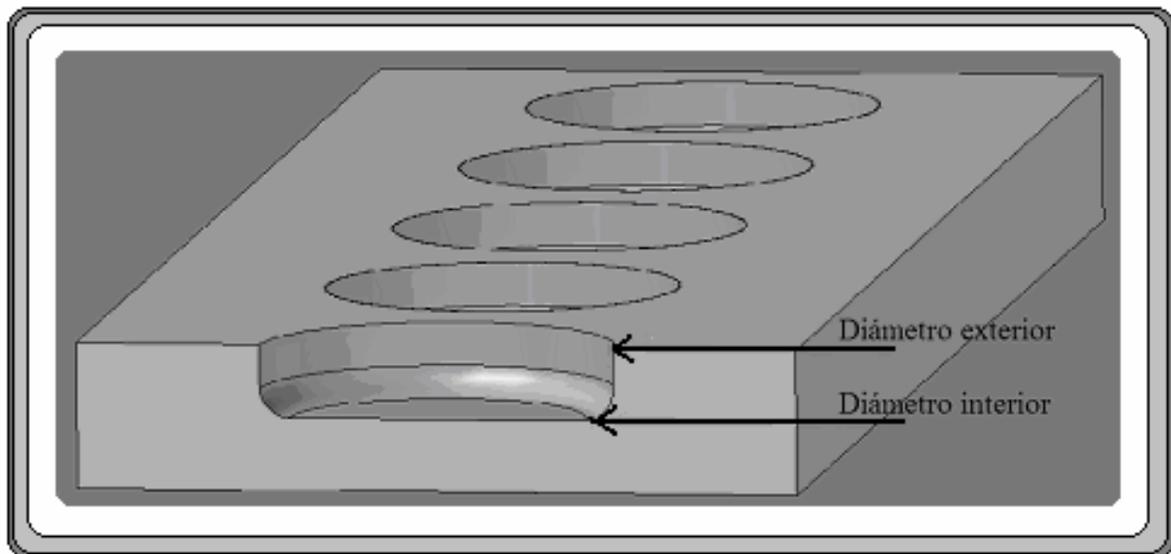


FIGURA 59. Cavidad obtenida después del proceso de electroerosión. La cavidad comprende un diámetro interior y otro exterior.

TABLA 17. Resultados de la variación de las diferencias del diámetro ( $D_{\text{EXTERIOR}}$ ,  $D_{\text{INTERIOR}}$ ) después del proceso de electroerosión con electrodo de **Grafito**.

No. Prueba	Tipo de diámetro	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)
1	Exterior	25.46	25.45	25.45	25.45	25.46
1	Interior	25.38	25.38	25.37	25.37	25.38
2	Exterior	25.52	25.52	25.52	25.53	25.53
2	Interior	25.48	25.48	25.48	25.49	25.48
3	Exterior	25.58	25.58	25.58	25.57	25.57
3	Interior	25.51	25.51	25.51	25.52	25.52
4	Exterior	25.61	25.61	25.61	25.62	25.62
4	Interior	25.59	25.58	25.58	25.58	25.57
5	Exterior	25.66	25.67	25.67	25.67	25.67
5	Interior	25.65	25.65	25.64	25.65	25.65
6	Exterior	25.73	25.73	25.72	25.72	25.72
6	Interior	25.65	25.65	25.65	25.65	25.65

TABLA 18. Resultados de la variación de las diferencias del diámetro ( $D_{\text{EXTERIOR}}$ ,  $D_{\text{INTERIOR}}$ ) después del proceso de electroerosión con electrodo de **Cobre electrolítico**.

No. Prueba	Tipo de diámetro	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)
1	Exterior	25.40	25.39	25.40	25.40	25.40
1	Interior	25.52	25.52	25.53	25.53	25.53
2	Exterior	25.41	25.41	25.40	25.39	25.40
2	Interior	25.53	25.52	25.51	25.50	25.50
3	Exterior	25.30	25.32	25.31	25.31	25.32
3	Interior	25.52	25.53	25.53	25.50	25.51
4	Exterior	25.45	25.46	25.46	25.47	25.47
4	Interior	25.50	25.50	25.51	25.50	25.51
5	Exterior	25.49	25.49	25.49	25.50	25.49
5	Interior	25.55	25.56	25.55	25.55	25.56
6	Exterior	25.58	25.59	25.58	25.58	25.58
6	Interior	25.66	25.66	25.67	25.65	25.66

### 3.3.3 Rugosidad

La rugosidad es una de las irregularidades o asperezas de diferente longitud de onda que se superponen a la forma de la pieza y que definen su topografía. La rugosidad incluye las irregularidades de corto alcance en el espacio y la textura superficial inherente al proceso de fabricación, y está creada, por valles y picos de amplitud variable y espaciado superior a las dimensiones moleculares.

En este caso el equipo utilizado para obtener la rugosidad es un rugosímetro electromecánico Mitutoyo, modelo SURFTEST – 402 (FIGURA 60). Los rugosímetros sirven para detectar de forma rápida las profundidades de la rugosidad en las superficies de materiales e indican en  $\mu\text{m}$  la profundidad de la rugosidad **Rz** (promedio aritmético de cinco profundidades singulares consecutivas en la longitud de medición) y el promedio de rugosidad **Ra**.

**Ra:** Es el valor promedio de rugosidad en  $\mu\text{m}$  y es el valor promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad de la línea intermedia de la longitud de medición. El valor promedio de rugosidad es idéntico a la altura de un rectángulo donde su longitud es igual a la longitud total y esto a su vez es idéntico con la superficie de la suma que existe entre el perfil de rugosidad y la línea intermedia.

La importancia de la rugosidad radica principalmente en la comprobación de los diferentes acabados que la máquina de electroerosión puede generar al variar los parámetros de entrada. Cada serie de parámetros que se introducen, dan un acabado superficial diferente, por lo que se pueden obtener tantos acabados como combinaciones de parámetros posibles.

Para las pruebas realizadas, como es sabido, se utilizaron los parámetros sugeridos por el fabricante, por lo que los acabados obtenidos son fácilmente perceptibles a simple vista, y más aún, se puede saber que son diferentes al contacto. Al utilizar un rugosímetro, se comprueba lo que está expuesto, pero es necesario corroborarlo ya que es uno de los objetivos del presente trabajo saber las diferentes características de la cavidad erosionada con sus respectivas propiedades físicas, tales como la rugosidad, la dureza, dimensiones, estructura, etc.

También es necesario la comparación directa de los dos materiales con los que se crearon los electrodos, de ahí se obtienen los datos que en conjunto forman una tabla comparativa, donde se utilizan los mismos parámetros para la realización de las pruebas de ambos electrodos y donde se puede determinar entre otras cosas, qué material de electrodo proporciona una mejor superficie o una característica en especial.

Para la obtención de los resultados de las pruebas se realiza la medición del valor promedio de rugosidad superficial (**Ra**) en  $\mu\text{m}$  para cada cavidad con el rugosímetro antes mencionado, se considera tomar el valor de Ra ya que las tablas del fabricante se encuentran con esta medición y así resulta más fácil lograr una comparación adecuada.

De la Tabla 19 a la Tabla 24, se muestra los resultados obtenidos de la rugosidad en la zona electroerosionada o cavidad, para cada prueba con grafito y cobre electrolítico, así como los parámetros de rango y longitud de recorrido ( $\lambda$ ) especificados por el rugosímetro.

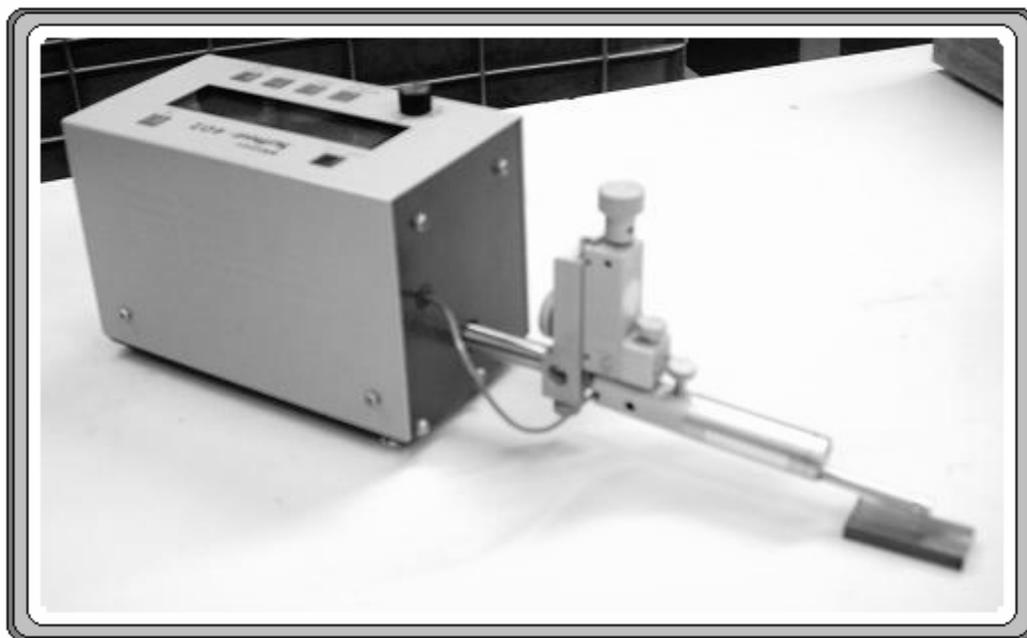


FIGURA 60. Rugosímetro electromecánico SURFTEST – 402.

TABLA 19. Comparación de la rugosidad (Ra) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo de la **prueba 1**.

No. de prueba	Electrodo utilizado	No. de cavidad	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
1	Grafito	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	5.2
1	Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	2.7
1	Grafito	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	3.0
1	Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	3.0
1	Grafito	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	3.2
1	Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	3.2
1	Grafito	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	2.6
1	Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	3.0
1	Grafito	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	4.5
1	Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	2.7

TABLA 20. Comparación de la rugosidad (Ra) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo de la **prueba 2**.

No. de prueba	Electrodo utilizado	No. de cavidad	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
2	Grafito	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	6.5
2	Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	4.7
2	Grafito	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.2
2	Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	3.0
2	Grafito	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.2
2	Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	4.5
2	Grafito	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.5
2	Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	4.0
2	Grafito	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.0
2	Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	4.0

TABLA 21. Comparación de la rugosidad (Ra) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo de la **prueba 3**.

No. de prueba	Electrodo utilizado	No. de cavidad	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
3	Grafito	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	8.0
3	Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	6.7
3	Grafito	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	8.2
3	Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.5
3	Grafito	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.7
3	Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	7.0
3	Grafito	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	8.0
3	Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	6.7
3	Grafito	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	8.0
3	Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	6.7

TABLA 22. Comparación de la rugosidad (**Ra**) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo de la **prueba 4**.

No. De prueba	Electrodo utilizado	No. de cavidad	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
4	Grafito	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	12.0
4	Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	9.7
4	Grafito	2	Ra = 20x5 $\lambda = 0.8$	9.1
4	Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	11.5
4	Grafito	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	12.2
4	Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	11.7
4	Grafito	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	12.5
4	Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	10.7
4	Grafito	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	11.7
4	Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	11.5

TABLA 23. Comparación de la rugosidad (Ra) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo de la **prueba 5**.

No. de prueba	Electrodo utilizado	No. de cavidad	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
5	Grafito	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	14.7
5	Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	11.2
5	Grafito	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	14.5
5	Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	14.2
5	Grafito	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	12.7
5	Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	14.2
5	Grafito	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	15.2
5	Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	13.7
5	Grafito	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	17.5
5	Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	11.2

TABLA 24. Comparación de la rugosidad (Ra) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo de la **prueba 6**.

No. de prueba	Electrodo utilizado	No. de cavidad	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
6	Grafito	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	18.7
6	Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	17.7
6	Grafito	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	19.7
6	Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	16.5
6	Grafito	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	20.2
6	Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	17.0
6	Grafito	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	21.5
6	Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	16.7
6	Grafito	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	20.0
6	Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5 $\lambda = 2.5$	16.0

### 3.3.4 Dureza

Se denomina dureza a la resistencia a ser rayado que ofrece la superficie lisa de un mineral, y refleja de alguna manera, su resistencia a la abrasión. Mediante el estudio de la dureza de un mineral se evalúa la estructura atómica del mismo pues es la expresión de su enlace más débil.

**Dureza Vickers** (HV): Sus unidades son  $\text{kg/mm}^2$ . Emplea como penetrador un diamante con forma de pirámide cuadrangular. Es adecuado para materiales blandos y para efectuar ensayos de dureza con chapas de hasta 2mm de espesor.

En el caso de la microdureza Vickers, el equipo para el ensayo se encuentra provisto de un microscopio que auxilia para localizar una indentación microscópica que debe de ser evaluada según sus tablas por el tamaño de su huella.

Para este trabajo, se requiere hacer pruebas de microdureza en la cavidad electroerosionada debido a dos razones principales:

- Para determinar cuál es el cambio sustancial en la estructura del acero debido al trabajo de electroerosión a nivel microscópico.
- Para determinar si la superficie ha sido modificada por la temperatura en el proceso de mecanizado de arranque de material.

Las temperaturas extremadamente altas ocurren durante la fase de descargas. La alta temperatura que se genera puede influenciar la cristalografía del material erosionado, aunque estas influencias pueden ser serias o irrelevantes de acuerdo con el material en uso en el proceso y la rugosidad del acabado de la superficie erosionada.

De la TABLA 25 a la TABLA 30, se muestra la comparación de los valores obtenidos de la dureza Vickers en las probetas para cada tipo de electrodo (grafito y cobre electrolítico) utilizados durante el proceso de electroerosión. Se realizaron 5 mediciones de acuerdo a lo establecido por la norma AISI en un Microdurómetro marca LEITZ-WETZLAR, tal y como lo muestra la FIGURA 61; se procede con una carga de 100 gramos, en una diagonal de  $1\mu\text{m}$ . Se obtiene el diámetro de la huella producida por el diamante, para obtener posteriormente de tablas, la dureza Vickers, esta dureza se obtiene por medio de la formula:

$$H_v = \frac{1854 \times P}{d^2}$$

donde P = carga

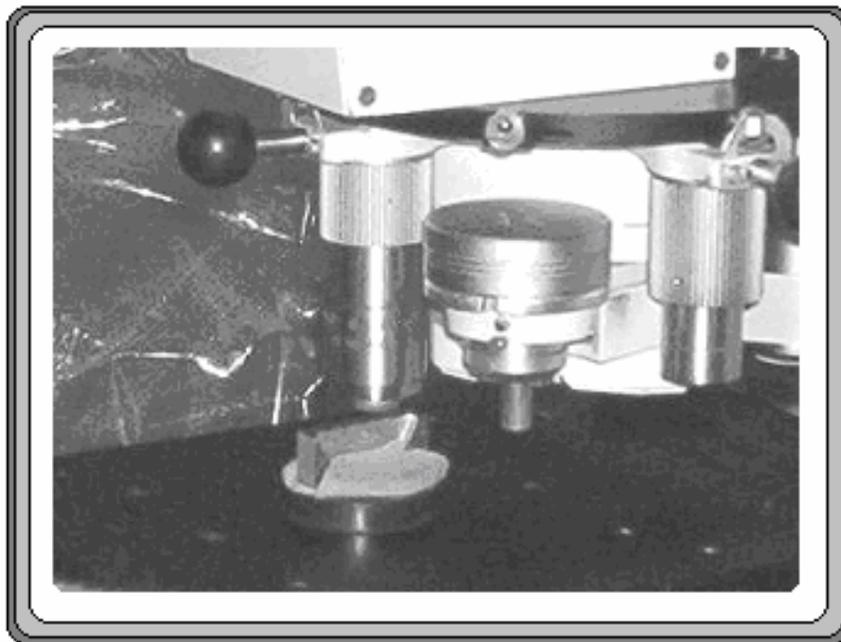


FIGURA 61. Preparación de la prueba de microdureza.

La microdureza por cada probeta se realiza en tres zonas diferentes, tal y como lo muestra la FIGURA 62. Se realizan 5 pruebas por cada zona. La zona 1 es cercana a la cavidad electroerosionada, la zona 2 es la parte intermedia de la probeta, la zona 3 es la más cercana a la superficie contraria a la cavidad electroerosionada.

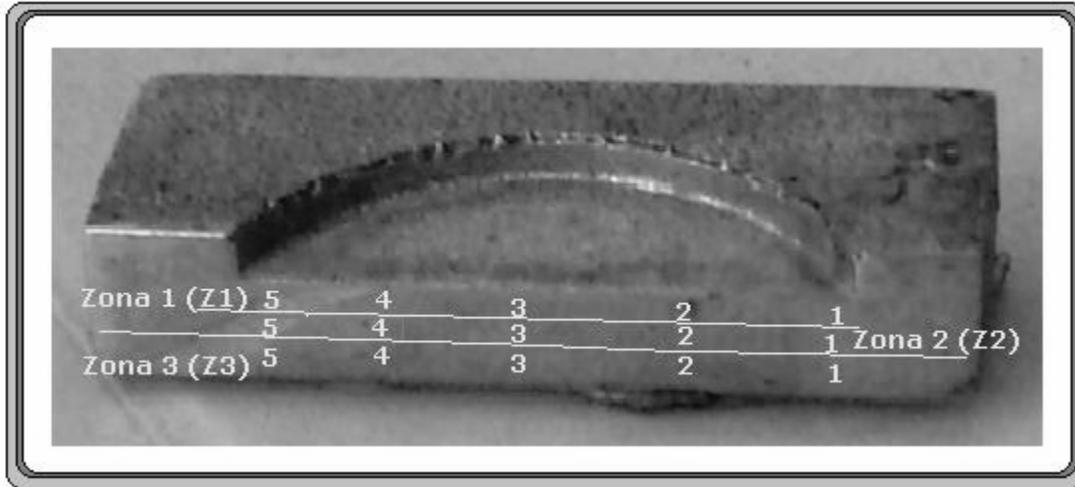


FIGURA 62. Zonas en la probeta sometidas a microdureza Vickers.

TABLA 25. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, **prueba1**

Prueba	Electrodo	No. medición	Z <sub>1</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )	Z <sub>2</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )	Z <sub>3</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )
1	Grafito	1	176	155	167
1	Cobre electrolítico	1	142	209	237
1	Grafito	2	270	209	188
1	Cobre electrolítico	2	197	201	224
1	Grafito	3	247	238	189
1	Cobre electrolítico	3	217	297	155
1	Grafito	4	206	164	193
1	Cobre electrolítico	4	258	264	232
1	Grafito	5	205	219	240
1	Cobre electrolítico	5	201	176	185

TABLA 26. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, **prueba 2**

<b>Prueba</b>	<b>Electrodo</b>	<b>No. medición</b>	<b>Z<sub>1</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>2</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>3</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>
2	Grafito	1	279	283	251
2	Cobre electrolítico	1	206	243	237
2	Grafito	2	222	164	253
2	Cobre electrolítico	2	278	235	260
2	Grafito	3	279	268	306
2	Cobre electrolítico	3	164	254	256
2	Grafito	4	285	283	232
2	Cobre electrolítico	4	258	276	264
2	Grafito	5	247	245	235
2	Cobre electrolítico	5	209	215	180

TABLA 27. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, **prueba 3**

<b>Prueba</b>	<b>Electrodo</b>	<b>No. medición</b>	<b>Z<sub>1</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>2</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>3</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>
3	Grafito	1	230	266	253
3	Cobre electrolítico	1	221	262	240
3	Grafito	2	224	268	247
3	Cobre electrolítico	2	238	243	247
3	Grafito	3	266	276	258
3	Cobre electrolítico	3	253	256	219
3	Grafito	4	233	209	201
3	Cobre electrolítico	4	217	224	173
3	Grafito	5	210	205	215
3	Cobre electrolítico	5	287	290	302

TABLA 28. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, **prueba 4**

<b>Prueba</b>	<b>Electrodo</b>	<b>No. medición</b>	<b>Z<sub>1</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>2</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>3</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>
4	Grafito	1	256	203	230
4	Cobre electrolítico	1	158	119	121
4	Grafito	2	254	266	268
4	Cobre electrolítico	2	258	193	203
4	Grafito	3	285	228	215
4	Cobre electrolítico	3	322	274	276
4	Grafito	4	240	221	203
4	Cobre electrolítico	4	268	222	262
4	Grafito	5	232	203	212
4	Cobre electrolítico	5	159	145	179

TABLA 29. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, **prueba 5**

<b>Prueba</b>	<b>Electrodo</b>	<b>No. medición</b>	<b>Z<sub>1</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>2</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Z<sub>3</sub> HV(kg/mm<sup>2</sup>)</b>
5	Grafito	1	176	217	207
5	Cobre electrolítico	1	123	123	258
5	Grafito	2	279	230	292
5	Cobre electrolítico	2	253	213	177
5	Grafito	3	254	253	247
5	Cobre electrolítico	3	292	240	279
5	Grafito	4	270	287	207
5	Cobre electrolítico	4	233	222	247
5	Grafito	5	233	210	192
5	Cobre electrolítico	5	195	240	224

TABLA 30. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, **prueba 6**

Prueba	Electrodo	No. medición	Z <sub>1</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )	Z <sub>2</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )	Z <sub>3</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )
6	Grafito	1	147	192	166
6	Cobre electrolítico	1	309	266	215
6	Grafito	2	228	185	221
6	Cobre electrolítico	2	260	212	245
6	Grafito	3	285	262	281
6	Cobre electrolítico	3	264	258	243
6	Grafito	4	247	245	206
6	Cobre electrolítico	4	233	210	213
6	Grafito	5	199	203	203
6	Cobre electrolítico	5	281	243	266

### **Dureza Rockwell**

Esta forma de medición de la dureza trabaja con un indentador de punta con un cono de diamante aunque en este caso particular se utilizó una bola de acero. La dureza se obtiene por medición directa y es apto para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella (Ver FIGURA 63).

Se realizaron pruebas de dureza con un Durómetro Rockwell, marca Misawa Seiki Seisakusho, escala: Rockwell B (HRB) con una carga de 100 kg y un penetrador de bola de 1/16" de diámetro.

Los objetivos principales son:

- Comprobar si el área electroerosionada cambió con respecto a las zonas donde no hubo trabajo de electroerosión.
- Saber si las propiedades de dureza cambian alrededor de la zona de trabajo.
- Determinar las características finales de la pieza.

Al ser la dureza una característica fácil de medir, se tomó como la parte inicial del trabajo para comprobar si la propiedad del material cambia.

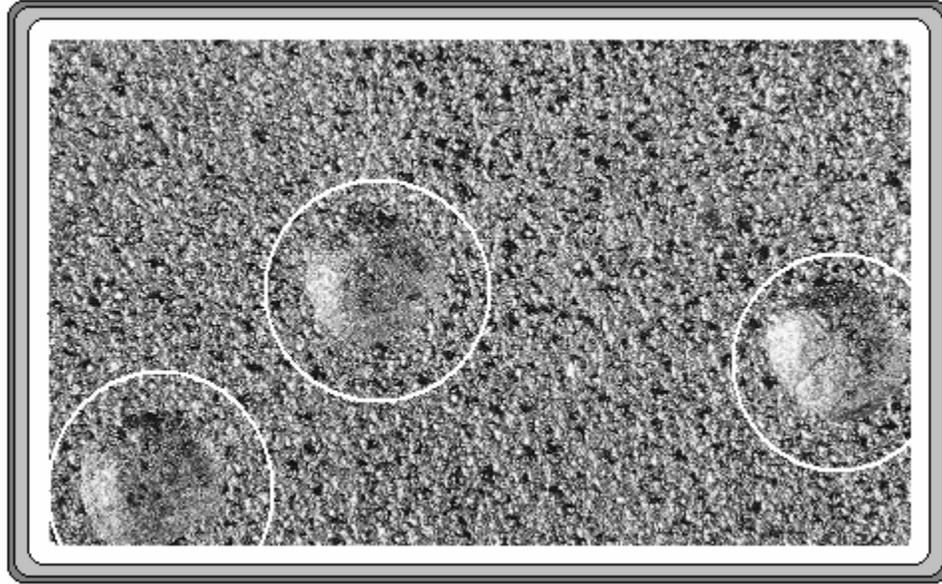


FIGURA 63. Macroscopía de la superficie erosionada de la muestra 3 de **Cobre electrolítico** a 32 X. Presentando huellas de la prueba de dureza Rockwell B (HRB).

Se realizan las pruebas de dureza indentando cinco veces en sitios preestablecidos, obteniendo los datos necesarios para establecer el análisis. Dichas zonas y su dirección están indicadas en la FIGURA 64. Es necesario señalar que esto se hizo para las muestras obtenidas con electrodo de Cobre electrolítico y Grafito. Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA 31 y TABLA 32.

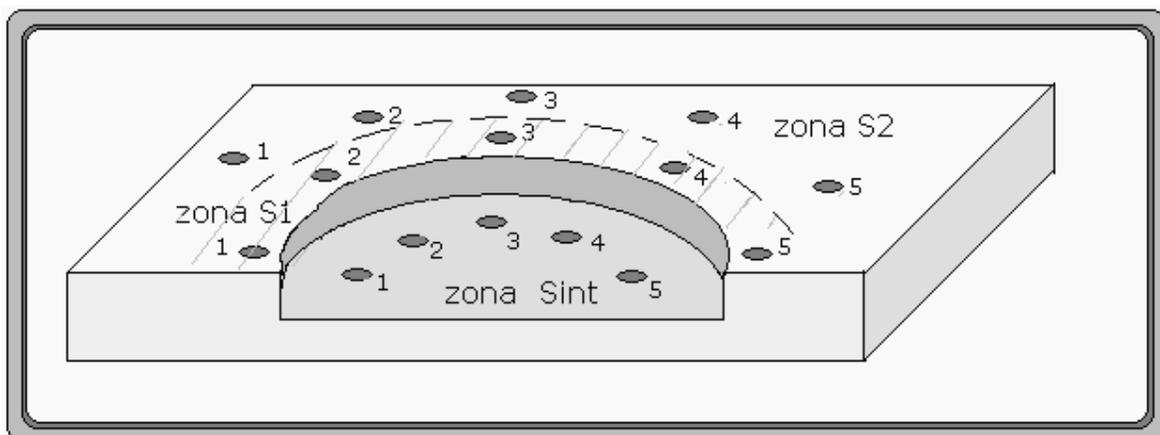


FIGURA 64. Ubicación de las indentaciones en las muestras

TABLA 31. Medición de la dureza en la placa de acero AISI 1018 de la **prueba 2** hecha con electrodo de **Cobre electrolítico**.

N° Prueba	S1 (RB)	S2 (RB)	Sint (RB)
1	70	73	71.5
2	73	71	70
3	73.5	72.5	71.5
4	72.5	71	67.5
5	71.5	72.5	73.5

TABLA 32. Medición de la dureza en la placa de acero AISI 1018 de la **prueba 2** hecha con electrodo de **Grafito**.

Medición	S1 (RB)	S2 (RB)	Sint (RB)
1	69.5	68.5	65
2	71	70	74
3	73	72.5	78
4	70.5	72	74
5	71.5	70	67.5

### 3.3.5 Macroscopía

Con el fin de tener mucha mayor información para demostrar las diferencias entre las superficies y características de las cavidades erosionadas con los dos materiales de los electrodos, se les hizo una serie de fotografías en un Fotomicroscopio marca Wild Heerbrugg, modelo M400 auxiliado por un Fotoautomático Wild modelo MPS 55, a un aumento de 32X. Para la obtención de las macroscopías, se hizo una preparación metalográfica a las piezas trabajadas, obteniendo de las placas un espécimen de aproximadamente la mitad de una huella electroerosionada, esta preparación sirvió a su vez para hacerles estudios microscópicos a fin de ver si existen cambios en su estructura y sus características. Las fotografías de las piezas, se encuentran agrupadas en los recuadros; se muestra la zona donde se forma el arco y la superficie erosionada. El análisis y las comparaciones se harán en el capítulo 4.

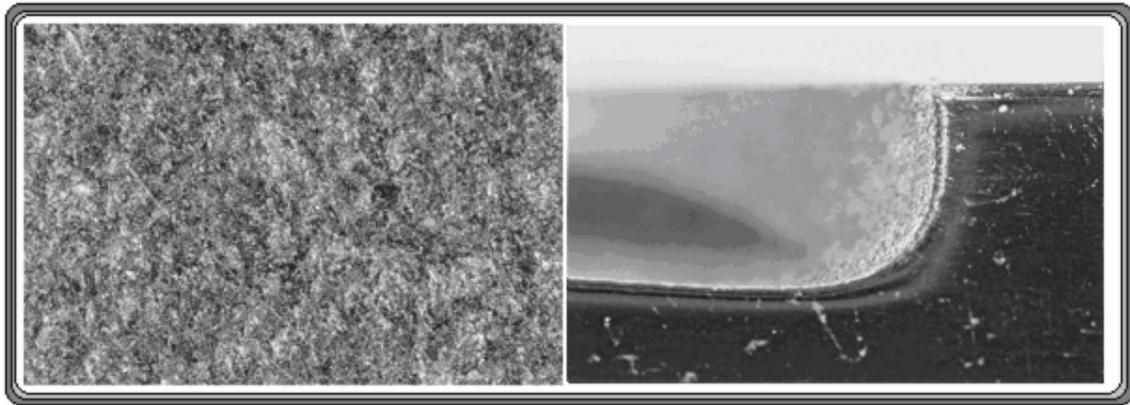


FIGURA 65. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de la zona final del perímetro de la **prueba 1** de **Grafito** (der). Con un aumento de 32 X. Se nota la rugosidad fina con poca porosidad y una definición de la conicidad formada.

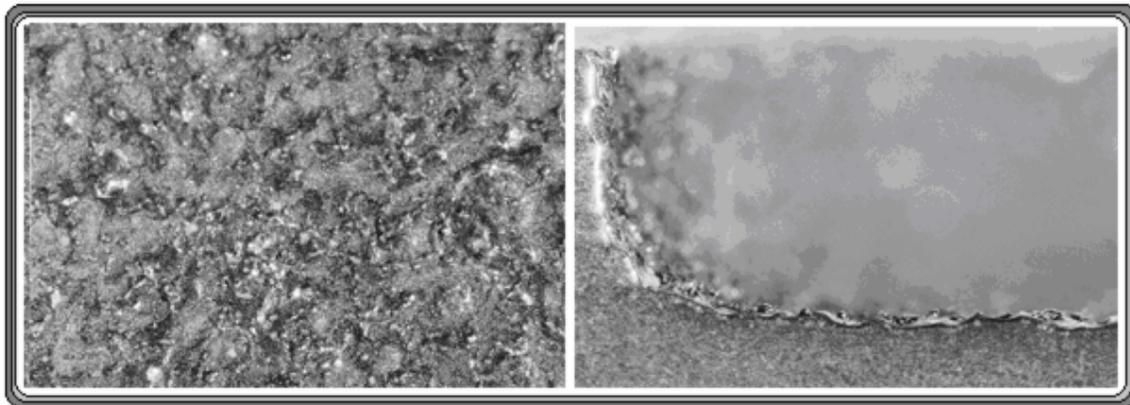


FIGURA 66. Macroscopía de la superficie (izq) y de la zona final del perímetro de la **prueba 2** de **Grafito** (der), a 32 X. La rugosidad presentada es de  $6.5 \mu\text{m}$  y lo manifiesta la granulación de la superficie, marcándose también la conicidad al final de la cavidad.

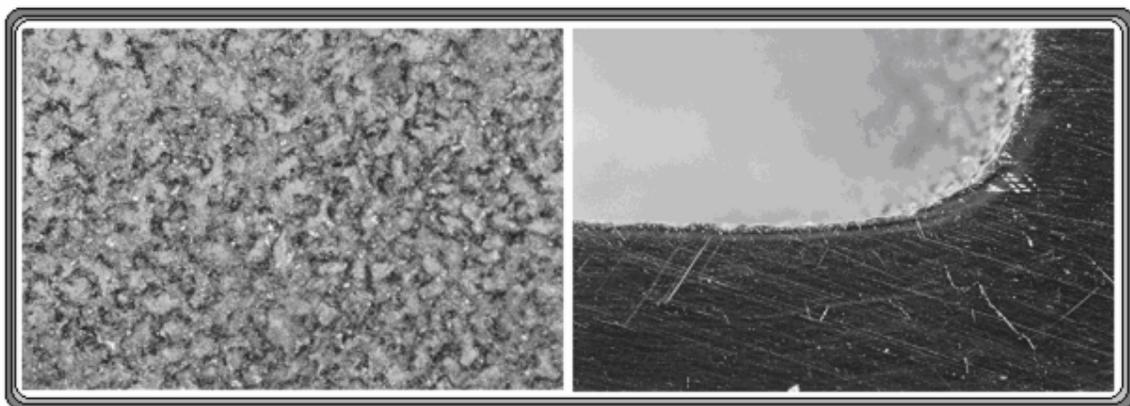


FIGURA 67. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de la zona final del perímetro de la **prueba 3** de **Grafito** (der). Con un aumento de 32 X. Su superficie es mas constante, es menos porosa y mantiene la conicidad de las otras pruebas.

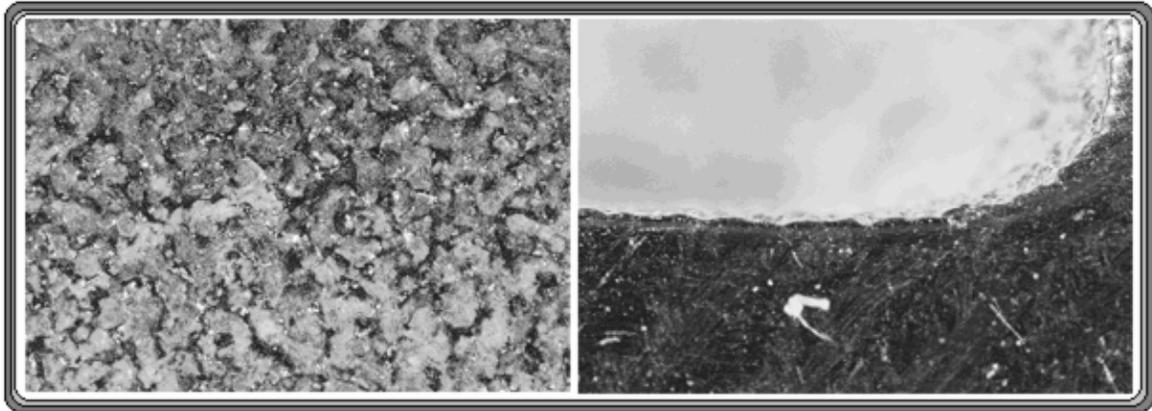


FIGURA 68. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de la zona final del perímetro de la **prueba 4 de Grafito** (der), a 32 X. la conicidad se pronuncia más y se define una rugosidad alta.

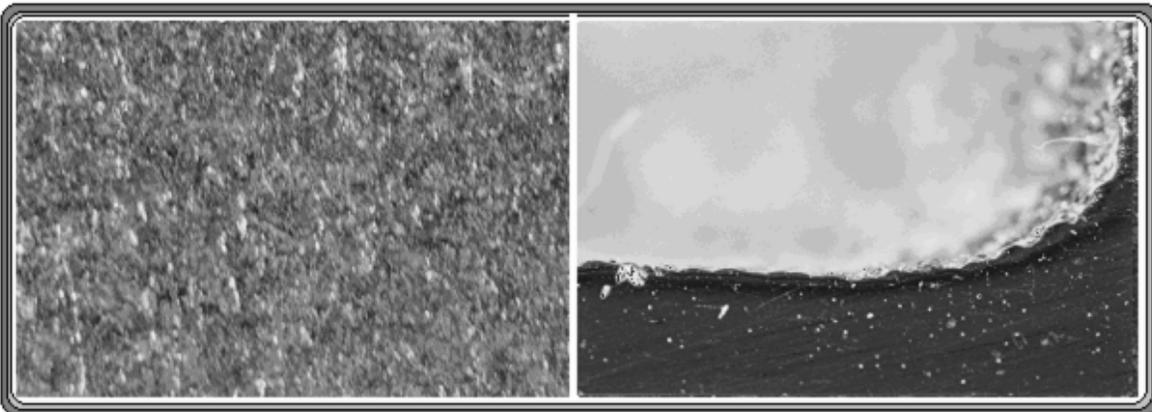


FIGURA 69. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de la zona final del perímetro de la **prueba 5 de Grafito** (der). Con un aumento de 32 X. en este caso, la definición de la superficie tiende a ser menos rugosa, definiendo una conicidad más amplia.

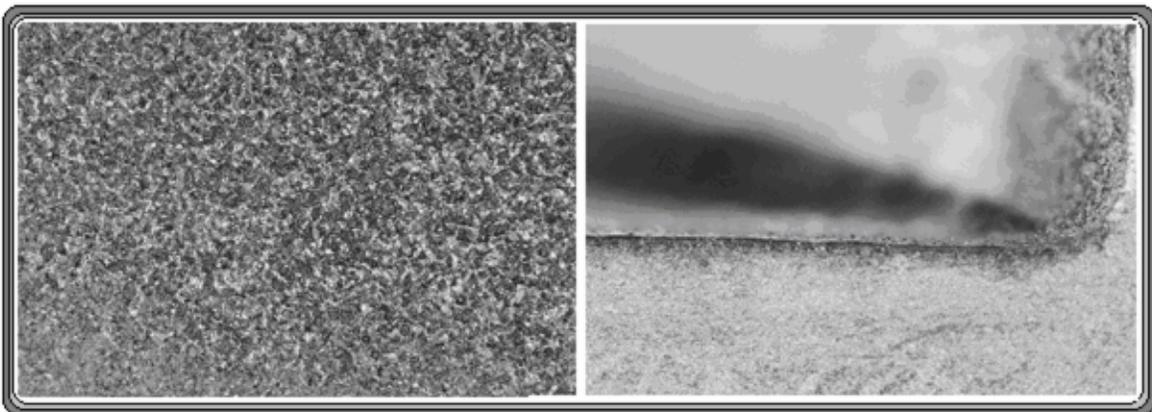


FIGURA 70. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de la zona final del perímetro de la **prueba 6 de Grafito** (der). Con un aumento de 32 X. es de las pruebas más finas respecto a los resultados obtenidos, la superficie es homogénea, hay poca porosidad y la conicidad es más definida al igual que la cavidad formada.

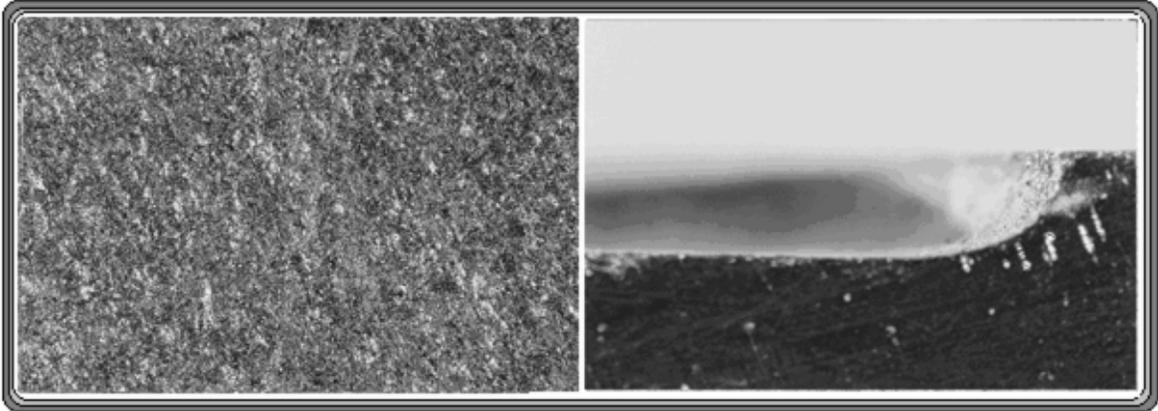


FIGURA 71. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de zona final del perímetro de la **prueba 1** de **Cobre electrolítico** (der) a 32 X. se define menos la conicidad y la superficie es de una rugosidad muy pequeña.

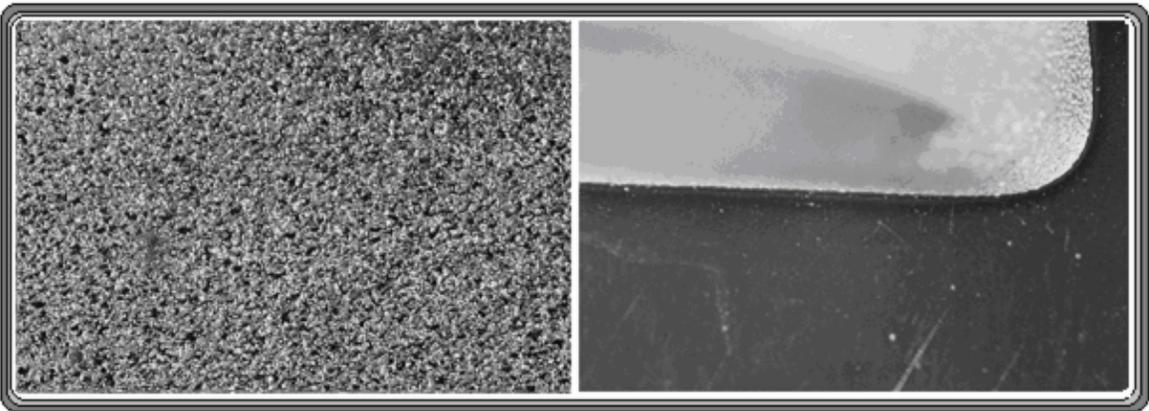


FIGURA 72. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de zona final del perímetro de la **prueba 2** de **Cobre electrolítico** (der). Con un aumento de 32 X. la porosidad es mínima y la conicidad es menor. Se define una superficie constante.

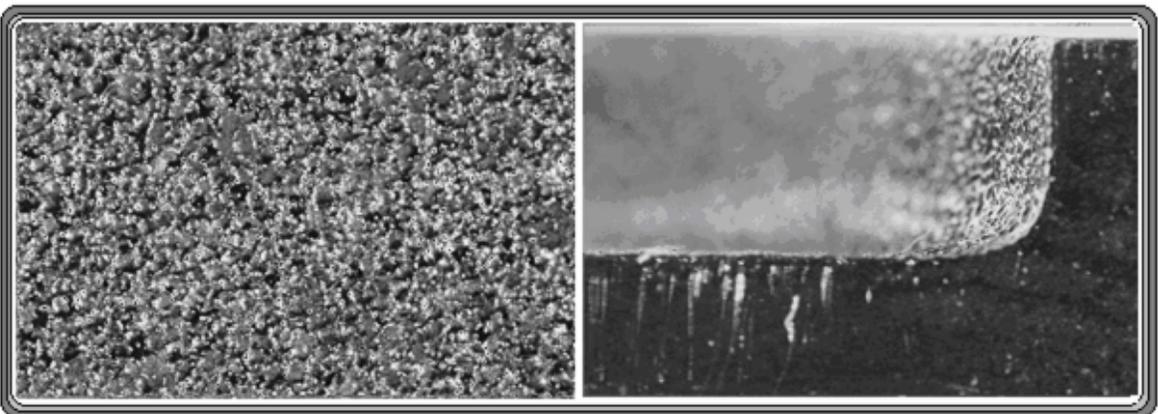


FIGURA 73. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de zona final del perímetro de la **prueba 3** de **Cobre electrolítico** (der) a 32 X. hay mas poros y la superficie se va tornando mas rugosa.

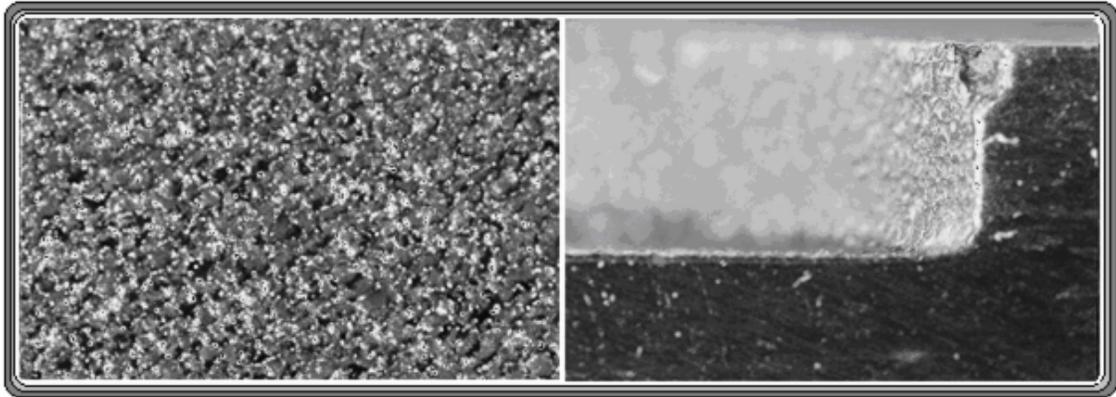


FIGURA 74. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de zona final del perímetro de la **prueba 4** de **Cobre electrolítico** (der), a 32 X. Se nota que la cavidad tiene una mayor definición, la zona final tiene menos conicidad, se aprecia en la parte superior un defecto provocado por el maquinado que se le efectuó, independiente de la zona trabajada.

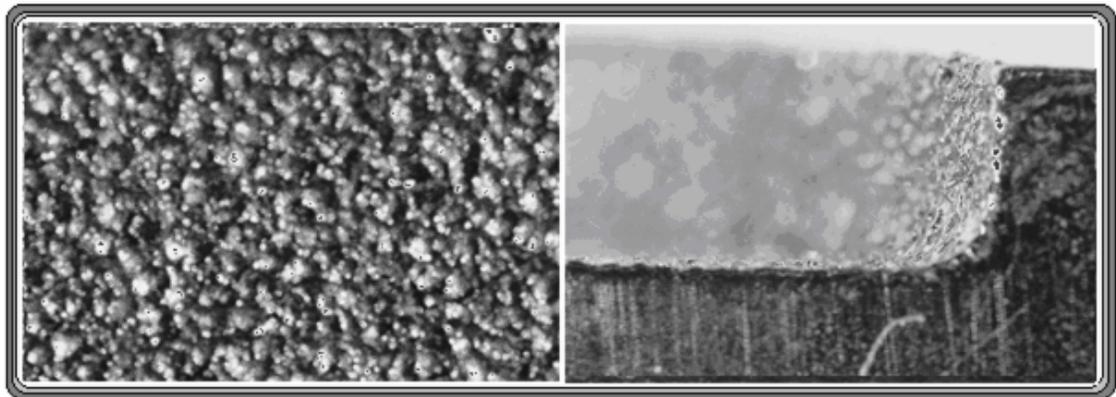


FIGURA 75. Macroscopía de la superficie erosionada (izq) y de zona final del perímetro de la **prueba 5** de **Cobre electrolítico** (der) a 32 X. es de las superficies mas rugosas, hay poros aunque su definición es bastante pronunciada y de gran rugosidad.

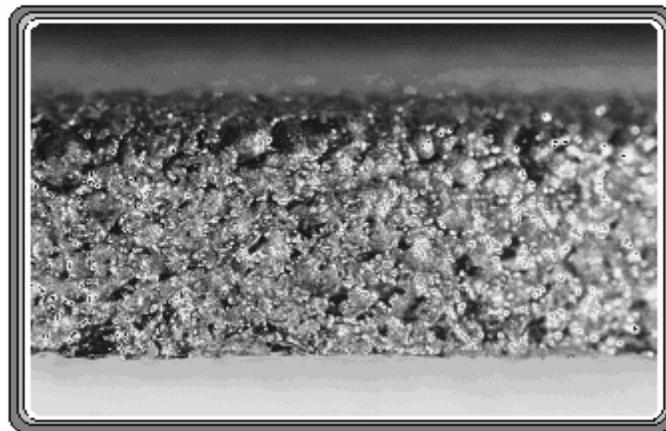


FIGURA 76. Macroscopía de la zona lateral erosionada de la **prueba 5** de **Cobre electrolítico**. Se manifiestan poros en toda la zona, al igual que su alta rugosidad.

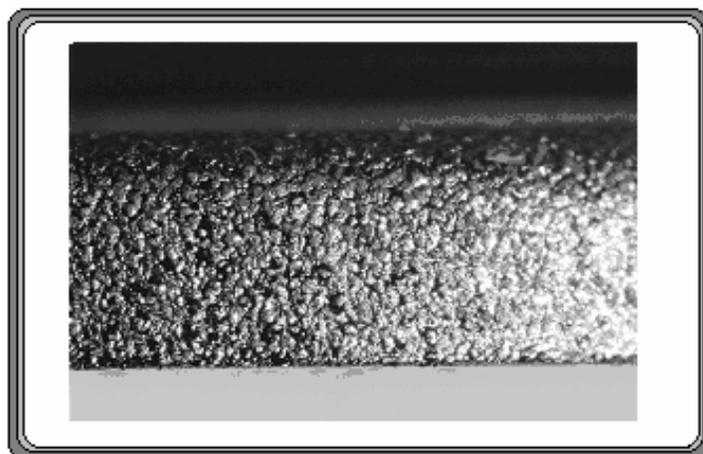


FIGURA 77. Macroscopía de la zona lateral erosionada de la **prueba 3 de Grafito electrolítico**. Los poros de notan de menor tamaño en referencia de la prueba 5 de grafito, su definición de la superficie es mejor y su rugosidad se mantiene constante a todo lo largo del perímetro.

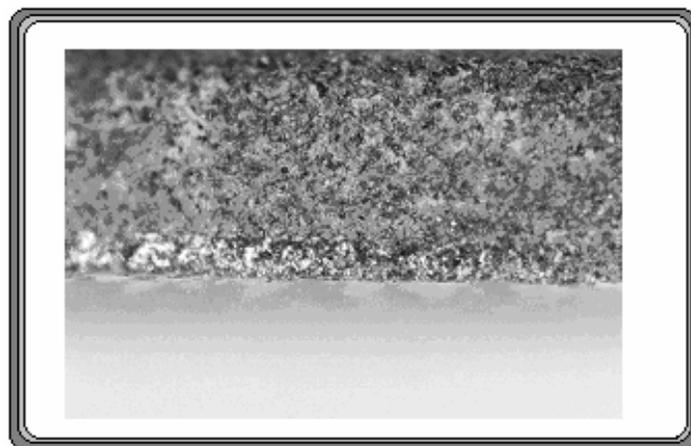


FIGURA 78. Macroscopía de la zona lateral erosionada de la **prueba 6 de Cobre electrolítico**, se nota una parte afectada pero al analizarla microscópicamente toda esta parte no varía.

## **CAPITULO 4.**

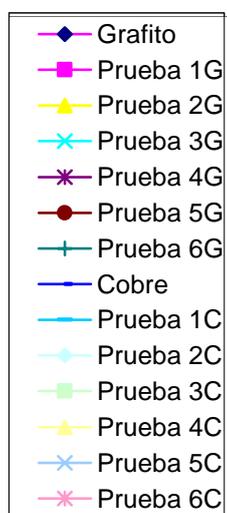
### **ANALISIS DE RESULTADOS**

Al analizar los diversos resultados es necesario hacerlo de acuerdo en la forma que se trabajó, es imprescindible empezar por la parte del mecanizado que es la parte principal del estudio, para ello la información de las tablas presentadas en las secciones anteriores son desarrolladas de manera que los resultados son los promedios de cada prueba y su comparación se basa en los diferentes resultados obtenidos, los resultados se han graficado, donde se puede analizar y comparar directamente los datos obtenidos. Las graficas que se analizan a continuación contienen la comparación de los resultados para cada prueba con respecto al electrodo de Grafito y Cobre electrolítico.

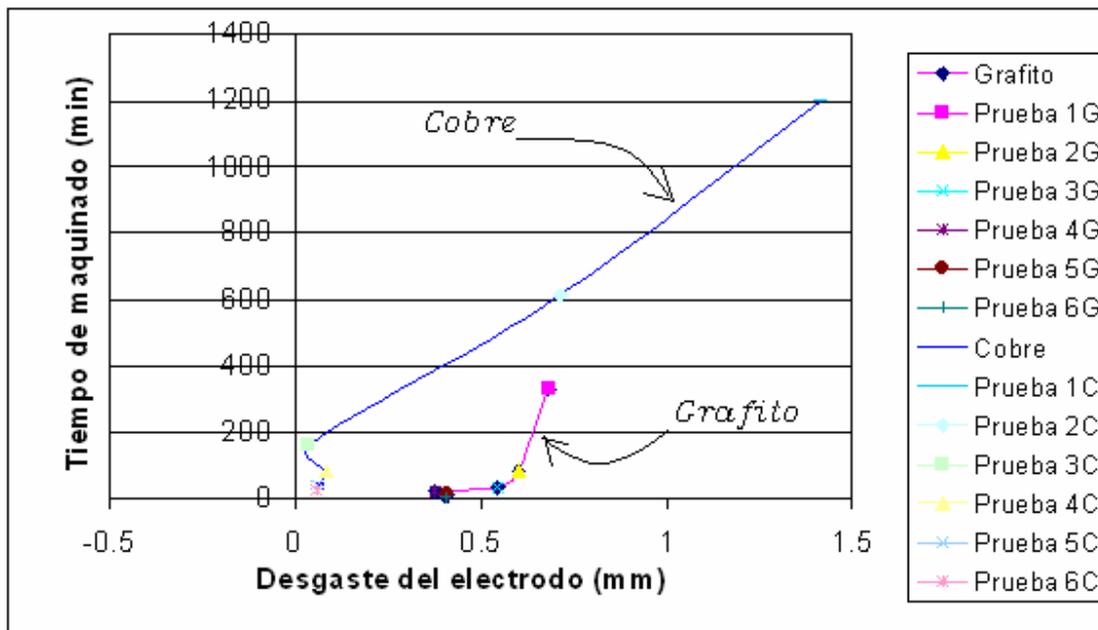


## 4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN GRÁFICAS

La primera parte a estudiar es el desgaste del electrodo con respecto al tiempo de maquinado, esta parte es fundamental ya que los resultados obtenidos dan una clara relación entre la cantidad de material que se lleva el proceso EDM en el electrodo y el tiempo que tarda en efectuarse el trabajo requerido, cada prueba esta puntualizada como un promedio de las cinco cavidades erosionadas y a su vez se van relacionando con el material que se empleó como electrodo. En general las tablas contienen cada uno de los puntos de intersección con un nombre definido por el número de prueba de cada material, en las graficas que se muestran a continuación y que parten de la GRAFICA 1 y hasta la GRAFICA 6, la simbología es la siguiente:



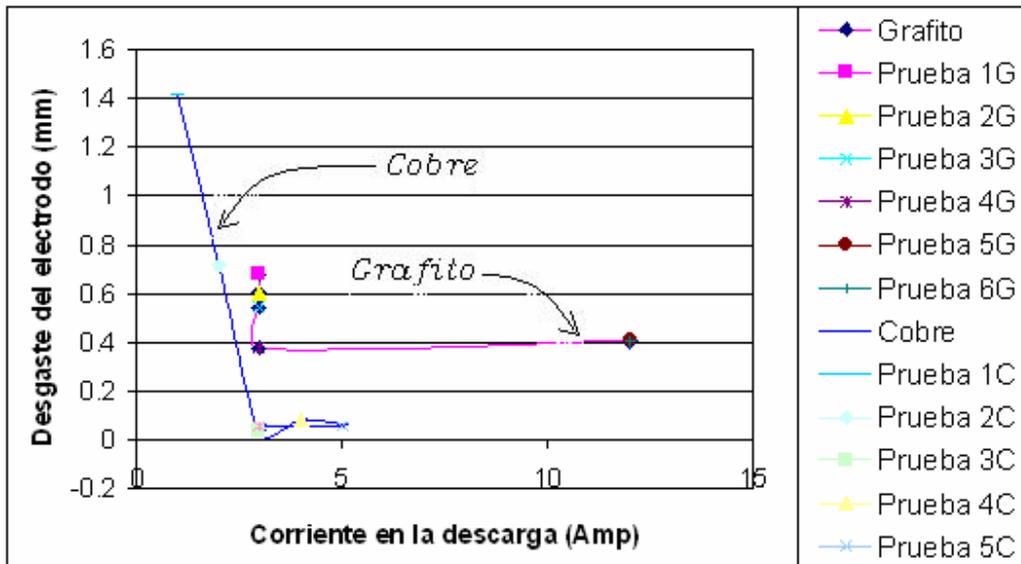
- **Grafito.**- es la trayectoria de todos los puntos representantes de las pruebas efectuadas con el electrodo de Grafito.
- Prueba 1G.- promedio de los eventos o **prueba 1** realizada con Grafito
- Prueba 2G.- promedio de los eventos o **prueba 2** realizada con Grafito
- Prueba 3G.- promedio de los eventos o **prueba 3** realizada con Grafito
- Prueba 4G.- promedio de los eventos o **prueba 4** realizada con Grafito
- Prueba 5G.- promedio de los eventos o **prueba 5** realizada con Grafito
- Prueba 6G.- promedio de los eventos o **prueba 6** realizada con Grafito
  
- **Cobre.**- es la trayectoria de todos los puntos representantes de las pruebas efectuadas con el electrodo de Cobre electrolítico.
- Prueba 1G.- **prueba 1** realizada con Cobre electrolítico
- Prueba 2G.- **prueba 2** realizada con Cobre electrolítico
- Prueba 3G.- **prueba 3** realizada con Cobre electrolítico
- Prueba 4G.- **prueba 4** realizada con Cobre electrolítico
- Prueba 5G.- **prueba 5** realizada con Cobre electrolítico
- Prueba 6G.- **prueba 6** realizada con Cobre electrolítico



GRAFICA 1. Análisis comparativo para cada prueba promedio al desgaste del electrodo de Grafito y Cobre electrolítico respecto a el Tiempo de maquinado.

### ANÁLISIS 1.

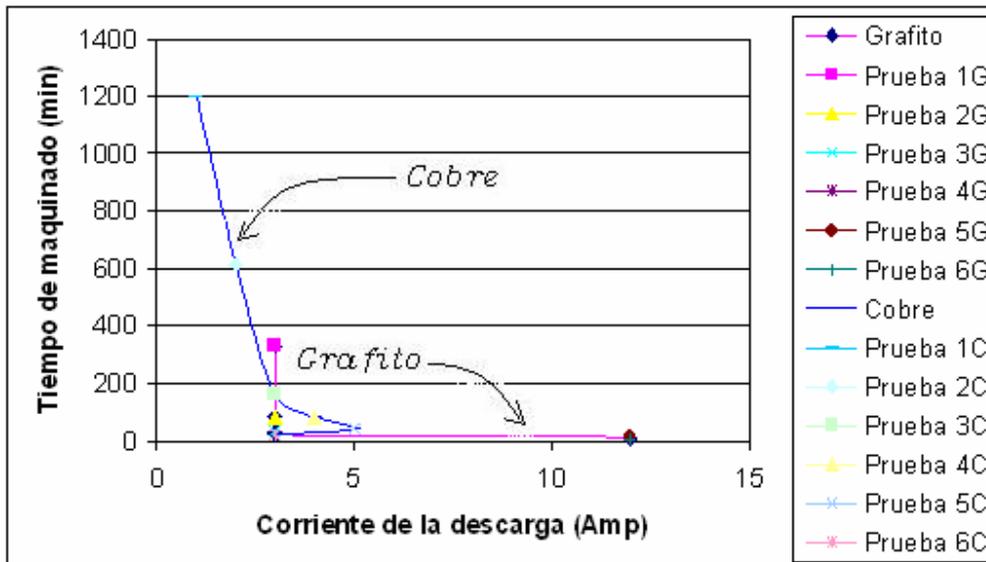
- Para un mayor tiempo de maquinado el electrodo de Cobre electrolítico se desgasta longitudinalmente más que el electrodo de Grafito, si el tiempo de maquinado disminuye se conserva la tendencia hasta cuando se realiza un erosión por debajo de los 35min (Prueba 3G), ya que por debajo de este tiempo el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico.
- El desgaste en los electrodos es superior a los 83min de erosión (Prueba 3G).
- El electrodo de Cobre muestra una linealidad después de la prueba 3C, lo que es notorio cuando los parámetros de trabajo son mas altos y los tiempos se disparan aunque crecen de manera lineal.
- El rango de trabajo del electrodo de grafito se localiza en una zona donde los tiempos son bajos y el desgaste se maneja alrededor de los 5mm.



GRAFICA 2. Análisis comparativo para cada prueba promedio en el Desgaste del electrodo de Grafito y Cobre electrolítico con respecto a la Corriente de descarga.

#### ANÁLISIS 2.

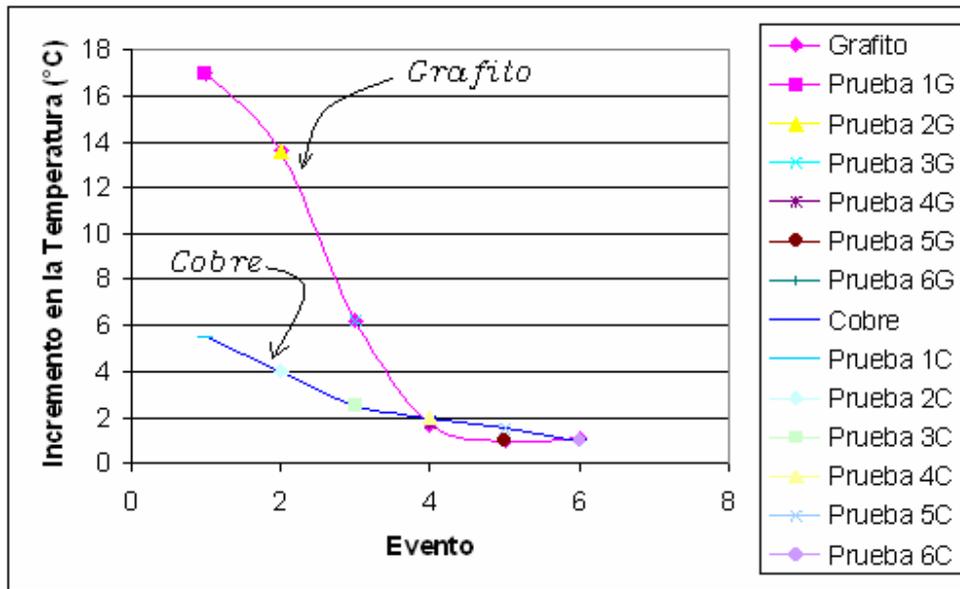
- Para una corriente de descarga menor a los 3Amp (Prueba 3G) el electrodo que se desgasta más longitudinalmente es el de Cobre electrolítico, sin embargo para una corriente de descarga superior a los 4Amp (Prueba 4G), el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico.
- Para poder realizar la Prueba 6 bajo los mismos parámetros para los dos electrodos (TS = 6, TH = 0, TON = 300, DT = 75, GAP = 5), se requiere para el electrodo de Grafito de una corriente mayor y un tiempo de maquinado menor a comparación del electrodo de Cobre electrolítico.
- El electrodo de grafito muestra una tendencia constante en cuanto a la corriente que utilizó para la realización de las pruebas aunque fue mucho menor que el electrodo de cobre.
- El electrodo de cobre presenta una tendencia al desgaste, mientras los parámetros son más bajos, esto lo determina en gran escala, las corrientes bajas que utiliza para el proceso.
- La prueba 1C, es en realidad la que se utiliza para obtener un mejor grado de rugosidad tipo espejo y como se nota en la gráfica es la que mayor desgaste tiene, debido a sus altos parámetros y poca corriente de descarga.
- También en el cobre se presenta la prueba con menor desgaste del electrodo con la máxima corriente que logró dicho electrodo, esto hace notar la amplitud de trabajo que puede realizarse con dicho material y las diferentes condiciones en las que puede ser trabajado.



GRAFICA 3. Análisis comparativo del Tiempo de maquinado con respecto a la Corriente de descarga para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico

### ANÁLISIS 3.

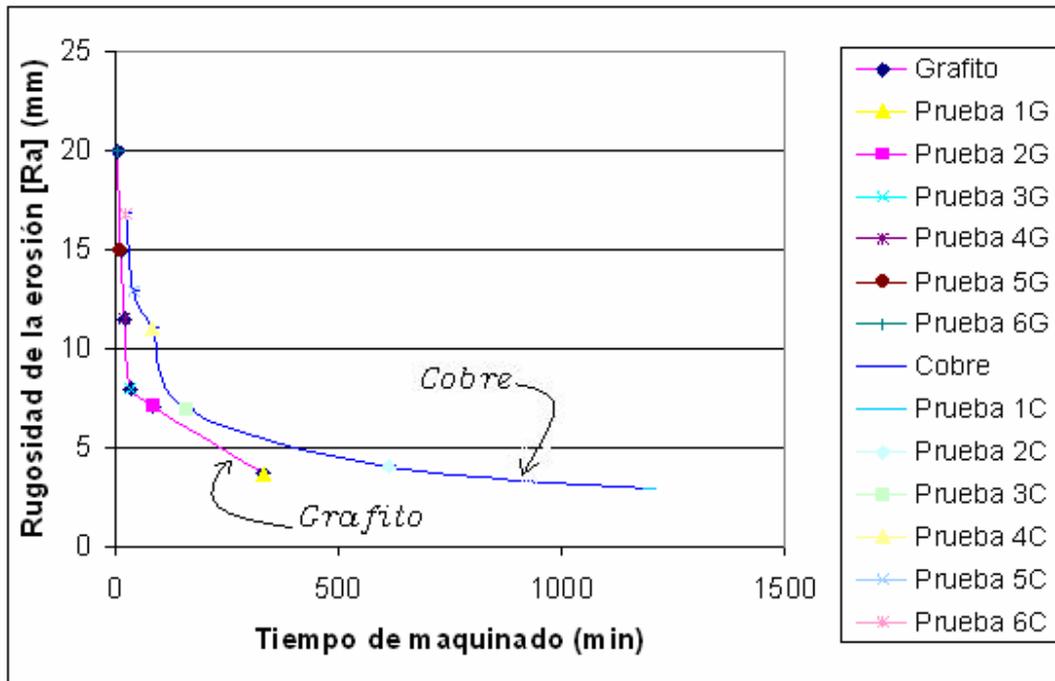
- Se requiere de una corriente de descarga mayor al trabajarse con electrodos de Grafito que cuando se trabaja con electrodos de Cobre electrolítico.
- El Tiempo de maquinado disminuye al trabajar con electrodos de Grafito.
- La corriente permanece casi constante en el electrodo de grafito a lo largo del tiempo
- El tiempo en el grafito es una cuarta parte que el necesario en el cobre, considerando los valores máximos de cada electrodo.
- El tiempo es proporcional a la corriente en las diferentes pruebas del electrodo de cobre electrolítico.



GRAFICA 4. Análisis del Incremento de Temperatura del fluido dieléctrico para cada prueba con electrodo de Grafito y Cobre electrolítico.

#### ANÁLISIS 4.

- Existe un mayor incremento en la temperatura en el fluido dieléctrico cuando se trabaja con electrodos de Cobre electrolítico que con respecto al Grafito.
- Los incrementos de temperatura son considerables al trabajarse con tiempos superiores a 83min (Prueba 4C) con electrodos de Cobre electrolítico.
- Al trabajar con electrodos de Grafito con tiempos superiores a 22min (Prueba 4G), los incrementos de temperatura en el fluido dieléctrico tienden a aumentar.
- Los electrodos de grafito mantienen un rango de temperaturas mucho mas estable que en el caso del cobre, aunque en las pruebas finales el incremento de temperatura se iguala, esto es debido a que los tiempos de electroerosión son muy cortos en ambos casos



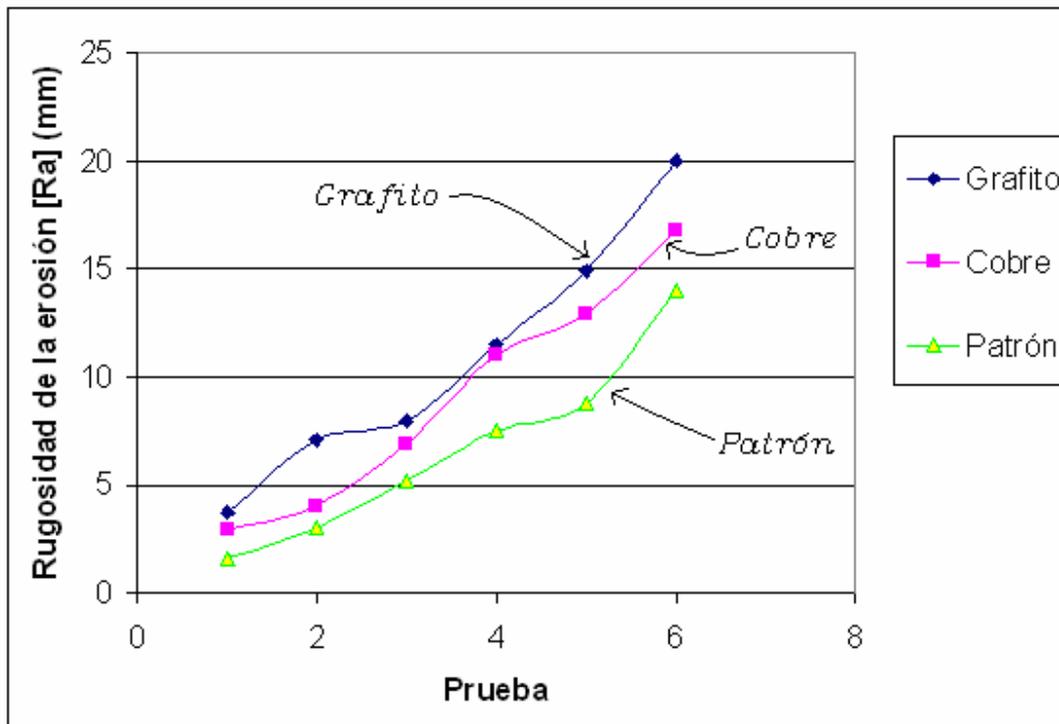
GRAFICA 5. Análisis comparativo de la Rugosidad promedio (Ra) de la cavidad erosionada con respecto al Tiempo de maquinado para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.

#### ANÁLISIS 5.

- Para cualquier tiempo de maquinado, se obtiene un mejor acabado superficial al trabajarse con electrodos de Cobre electrolítico, ya que se obtiene una mejor rugosidad, es decir, la rugosidad con electrodos de Cobre electrolítico es menor que con electrodos de Grafito.
- Los tiempos de maquinado son mayores cuando se trabaja con electrodos de Cobre.
- La rugosidad mas fina se alcanza cuando el tiempo de maquinado es mayor, en los dos electrodos, el nivel de rugosidad en el cobre es mejor.
- Al tener un menor tiempo de trabajo en el grafito se asegura una menor inversión tanto de desgaste de la maquina como el aprovechamiento del tiempo para realizar el trabajo.
- En ambos casos mientras menor es el tiempo de maquinado se obtiene una rugosidad mayor, por lo que la calidad de la huella erosionada es cada vez de menor calidad conforme se van acortando los tiempos de trabajo.

En la GRAFICA 6 el análisis es con respecto a la rugosidad. Para poder establecer una comparación de los materiales de los electrodos, se tomó en consideración, medir las rugosidades de cada una de las pruebas efectuadas por los diferentes electrodos, se hicieron cinco mediciones de rugosidad para cada cavidad y se hizo un promedio para establecer la relación de todos los valores obtenidos.

En este caso se consideró también el bloque patrón que está premaquinado por el fabricante y al cual pertenecen también los mismos parámetros de trabajo que los dispuestos para las pruebas de Grafito y Cobre electrolítico.

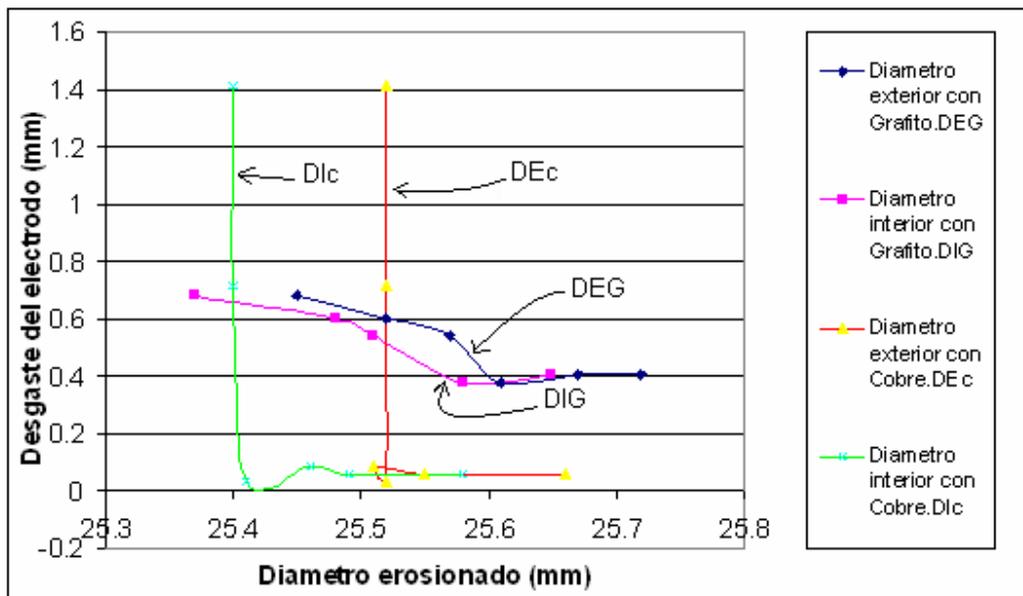


GRAFICA 6. Análisis comparativo de la Rugosidad promedio (Ra) de la cavidad erosionada para los electrodos de Grafito, Cobre electrolítico y de la muestra patrón del fabricante trabajada con electrodo de Cobre electrolítico para cada tipo de prueba.

#### ANÁLISIS 6.

- Al hacer una comparación de rugosidades de los dos tipos de electrodos empleados con respecto a la muestra patrón del fabricante, se determina que el mejor acabado superficial nos lo proporciona el electrodo de Cobre electrolítico, acercándose al patrón establecido y siendo menores los valores de rugosidad con respecto al Grafito en cada prueba realizada.
- El Cobre aunque tiene valores mas altos, no presenta resultados muy diferentes al de grafito, solo que al ser estrictos con cada prueba, los mejores valores son los del grafito.
- Las rugosidades de ambos electrodos están por arriba de los valores establecidos por el bloque patrón, por lo que se puede concluir que los resultados reales serán diferentes y más altos en su rugosidad a los que se estipulan por el fabricante.

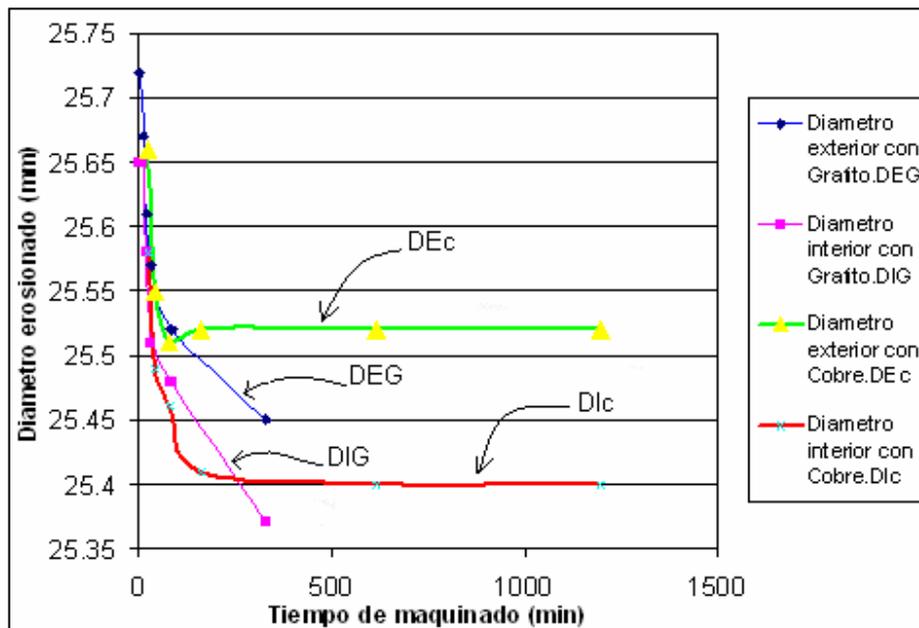
Para las GRAFICAS 7 y 8 se analizan los diámetros de las cavidades con respecto al desgaste de los electrodos y al tiempo de maquinado, como se mencionó en el apartado 3.4.2 del capítulo 3, el diámetro de la cavidad se muestra en forma cónica por lo que se determinan el  $D_{EXTERIOR}$  y el  $D_{INTERIOR}$  para cada uno de los electrodos aplicados. En este caso no se menciona el número de pruebas ya que el objetivo de este análisis es comparar el comportamiento entre ambos electrodos para lograr obtener la información necesaria para una evaluación de las condiciones y ventajas de uno respecto al otro.



GRAFICA 7. Análisis comparativo en el Desgaste de los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico con respecto a los Diámetros de la cavidad erosionada.

#### ANÁLISIS 7.

- Para un tiempo de maquinado superior a 614min (Prueba 2C) se presenta un mayor desgaste en electrodos de Cobre electrolítico que con electrodos de Grafito
- El desgaste que presenta el Cobre electrolítico es menor al trabajarse por debajo de 162min (Prueba 3C).
- La conicidad en los dos tipos de electrodos se hace más frecuente hasta la prueba 4 (Prueba 4G y Prueba 4C), estando relacionada directamente con el desgaste de los electrodos.
- Cuando el diámetro interior es menor al diámetro exterior de la cavidad, existe un mayor desgaste en los electrodos, sin embargo al disminuirse el diámetro interior y aproximarse al diámetro exterior (Pruebas 5C, 6C, 5G y 6G), el desgaste longitudinal tiende a estabilizarse de forma constante para los dos tipos de electrodos.



GRAFICA 8. Análisis comparativo de los Diámetros de la cavidad erosionada con respecto al Tiempo de maquinado para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.

#### ANÁLISIS 8.

- El resultado que se obtiene de la cavidad erosionada son dos diámetros diferentes; un diámetro exterior mayor a un diámetro interior. Este fenómeno es poco perceptible cuando se realiza un tiempo de maquinado relativamente bajo. Sin embargo, para los dos tipos de electrodos, se observa que para mayores tiempos de maquinado se presenta una conicidad mayor.
- Para el Cobre electrolítico la conicidad es mucho mayor que en el caso del Grafito.
- La conicidad presenta en el electrodo de cobre un diámetro interior casi constante después de los 162min de maquinado (Prueba 3C para los dos tipos de diámetros), por lo que el ángulo en la conicidad podría mantenerse constante.
- Al trabajar con electrodos de Grafito, se presenta el mismo fenómeno de conicidad, sin embargo al ir aumentando el tiempo de maquinado el diámetro interior va disminuyendo con respecto al diámetro exterior (Prueba 4G para los dos tipos de diámetros). Por lo que se puede considerar que el ángulo en la conicidad va cambiando al ir aumentando el tiempo.
- En esta gráfica se puede ver una gran similitud en el comportamiento de los dos electrodos ya que mientras los tiempos son bajos, el diámetro erosionado de los electrodos disminuye; y cuando los tiempos aumentan el diámetro erosionado tiende a crecer.

## 4.2 MACROSCOPIA DE LAS PIEZAS TRABAJADAS.

Para hacer una evaluación de la zona erosionada y de los posibles cambios sufridos por las altas temperaturas y las descargas eléctricas, se hizo una serie de análisis macroscópicos, se comparan las zonas donde se presenta el arco, al fondo de la cavidad erosionada donde se forma la conicidad, así como de la superficie obtenida. La finalidad radica en poder asegurar si existe algún cambio en la superficie, el inicio de alguna fractura y si existe algún cambio producido por la temperatura en la zona cercana a la cavidad, para determinar si existe una zona afectada térmicamente.

Se comparan también las cavidades de los dos materiales pero en esta ocasión de forma macroscópica, para comprobar los resultados de rugosidad que determinan que las superficies obtenidas por los dos electrodos son diferentes. El equipo utilizado para las tomas es el Fotomacroscopio Wild Heerbrugg M400 con el Fotoautomático Wild MPS 55, a un aumento de 32 X.

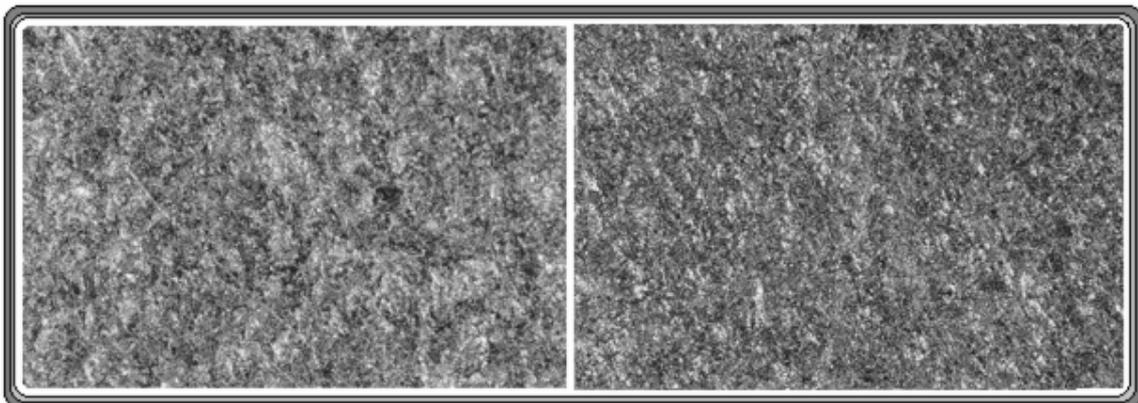


FIGURA 79. Macroscopía de la superficie erosionada de la **prueba 1** de Grafito (izq) y de la **prueba 1** con Cobre electrolítico (der). Con un aumento de 32 X.

### Análisis de la FIGURA 79

En esta comparación de las superficies obtenidas entre la prueba 1 de cobre y su respectiva prueba de Grafito se puede observar que la variación entre ambas es muy poca, según los datos obtenidos de la rugosidad en la prueba de Cobre su valor promedio de rugosidad superficial (**Ra**) es de 2.92  $\mu\text{m}$  mientras que para el Grafito el valor promedio es de 3.7 $\mu\text{m}$ , lo que la microscopía comprueba. Estas tomas se le hicieron a la parte de la superficie de cada huella, pero también se realizaron al corte transversal de la probeta (parte 3.4.5 capítulo 3) las que también confirman que existe una diferencia mínima pero que hace diferentes a ambas superficies. Con esta macroscopía se comprueba que la superficie con una rugosidad menor es la del Cobre electrolítico, cuestión que la prueba de rugosidad ya había confirmado.

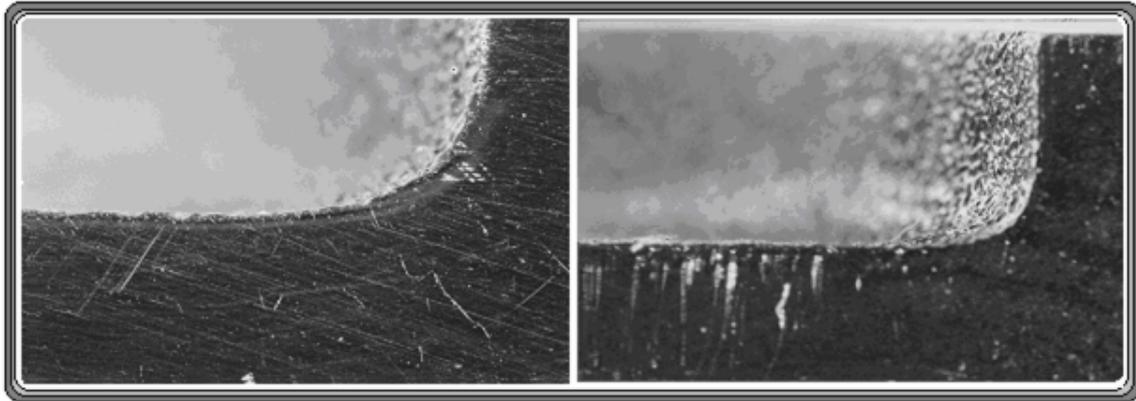


FIGURA 80. Macroscopía de la zona final del perímetro de la **prueba 3** de Grafito (izq) y de la **prueba 3** con Cobre electrolítico (der). Con un aumento de 32 X.

#### Análisis de la FIGURA 80

Esta Macroscopía muestra la zona donde se genera la curva en la parte inferior de la cavidad generada, a esta zona se le denomina “conicidad”, esta conicidad se debe al bombeo del líquido dieléctrico, ya que si este bombeo se hace a través y fuera del extremo del electrodo, las partículas se eliminan y se recogen principalmente en los bordes bajando la resistencia dieléctrica, por lo que las descargas regulares se convierten en arcos que producen irregularidades en la superficie de la pieza a mecanizar.

Por otro lado se puede apreciar en los dos materiales que no existe una zona afectada térmicamente por lo que el material permanece con la misma estructura. No hay formación de grietas y aunque existen muchas crestas y valles propias de la superficie, no son puntos generadores de fallas, no hay porosidades, ni se encuentran altas diferencias en su superficie, por lo que la rugosidad superficial es constante en el área. En cuestión de la dureza se verá en el apartado que le corresponde.

También se aprecia que el electrodo de Cobre electrolítico define mucho mas la cavidad erosionada por lo que la reproducción del electrodo en la placa de acero 1018 es mucho mejor que la que genera el electrodo de Grafito, esto se debe a que el tiempo de maquinado con el cobre electrolítico es mucho mayor, por lo que existió mucho mas bombeo de líquido dieléctrico en la zona trabajada y esta continuidad durante todo el proceso hizo que no fuera posible una gran acumulación de partículas en los bordes que provocaran una mayor conicidad.

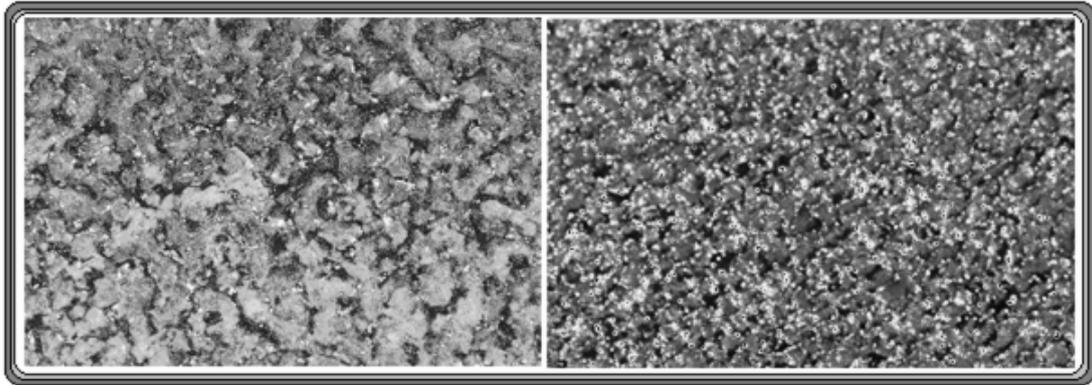


FIGURA 81. Macroscopía de la superficie erosionada de la **prueba 4** de Grafito (izq) y de la **prueba 4** con Cobre (der). Con un aumento de 32 X.

Análisis de la FIGURA 81

En este caso se observa que al igual que las demás pruebas el Cobre electrolítico da una rugosidad menor que el electrodo de Grafito, en la prueba de rugosidad el valor promedio de la superficie fue para el Cobre de  $1 \mu\text{m}$  mientras que para el Grafito el valor promedio fue de  $11.5 \mu\text{m}$ , en apariencia cambia bastante pero en realidad se está hablando de solo la mitad de una micra.

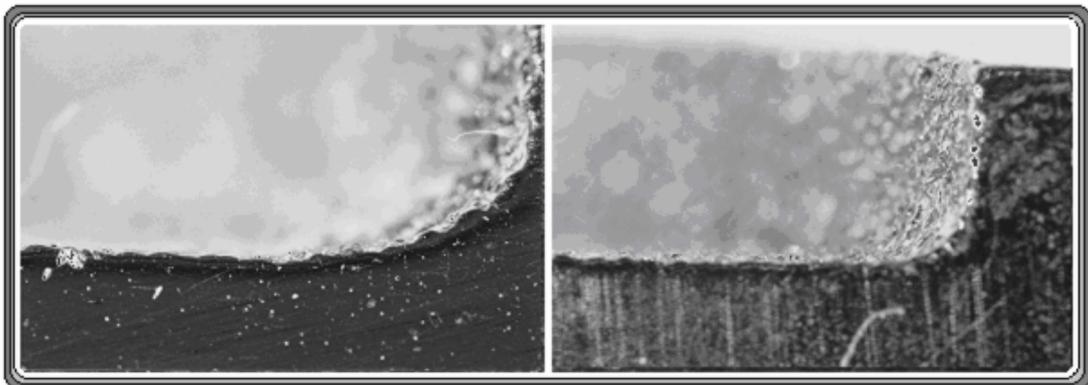


FIGURA 82. Macroscopía de la zona final del perímetro de la **prueba 5** de Grafito (izq) y de la **prueba 5** con Cobre electrolítico (der). Con un aumento de 32 X.

Análisis de la FIGURA 79

En este caso el electrodo de cobre definió mas la cavidad que el de Grafito, mas aún, en la prueba de grafito se nota la granulación propia de una marcada rugosidad a lo largo de la base que define la calidad superficial de la cavidad, que es mayor a la del otro electrodo. No se notan zonas afectadas térmicamente, ni inicios de fracturas, por lo que se corrobora que el maquinado por electroerosión es un proceso que afecta muy poco las propiedades del material a trabajar. La diferencia entre los valores promedios de rugosidad superficial entre los materiales utilizados para erosionar es de  $2 \mu\text{m}$ . ( $14.92 \mu\text{m}$  para el grafito y  $12.9 \mu\text{m}$  para el cobre).

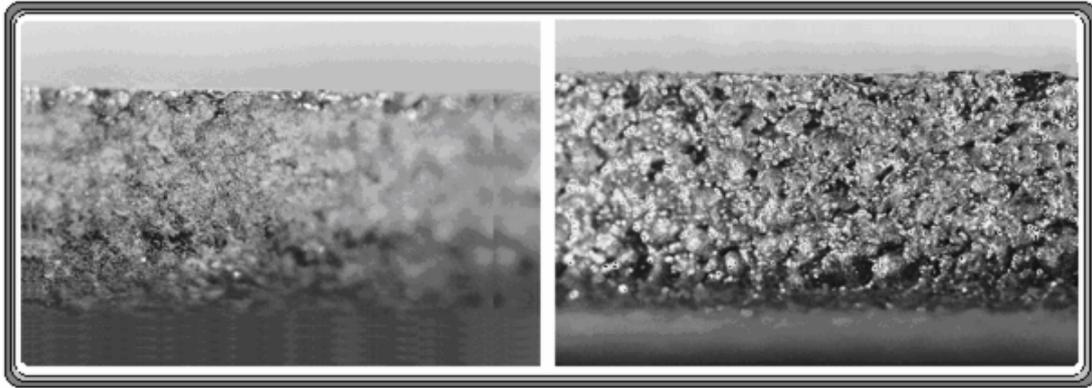


FIGURA 83. Macroscopía de la zona lateral de la cavidad erosionada de la **prueba 5** de Grafito (izq) y de la **prueba 5** con Cobre electrolítico (der). Con un aumento de 32 X.

#### Análisis de la FIGURA 83

Estas macroscopías se tomaron del corte transversal de la huella, es la superficie generada a lo largo del tiempo, podemos definirla como la altura de la cavidad erosionada. La rugosidad presente en esta zona no se pudo medir, sin embargo las características de la superficie parecen definirla aproximadamente igual a la superficie de la cavidad (ver FIGURA 82 y 83), por lo que al comparar los dos cortes, tanto el de cobre como el de Grafito, se consideran con las mismas diferencias que las rugosidades superficiales de los dos materiales. Se nota una porosidad en ambas superficies debido al maquinado, presentándose más notoriamente en la prueba de cobre electrolítico.

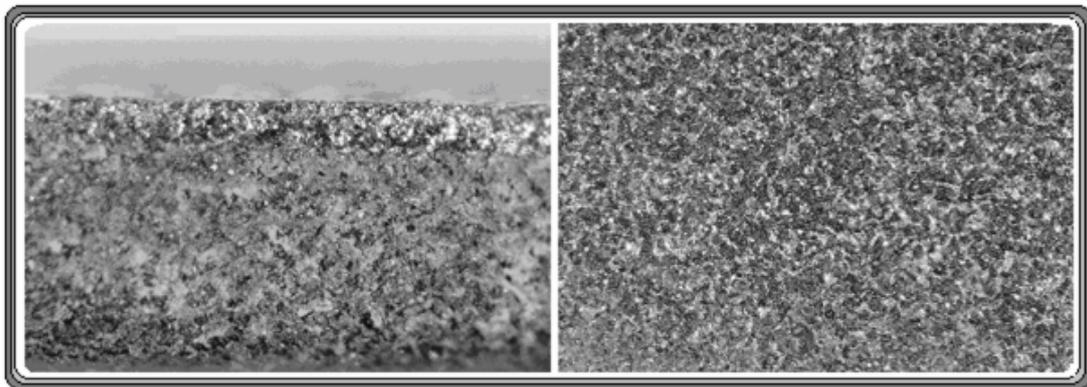


FIGURA 84. Macroscopía de la zona lateral de la cavidad erosionada de la **prueba 6** de Cobre electrolítico (izq) y de su superficie (der). Con un aumento de 32 X.

#### Análisis de la FIGURA 84

La porosidad es homogénea en toda la huella erosionada, se nota un cierto brillo en la superficie pero al hacer una microscopia se observa que las propiedades del material permanecen constantes.

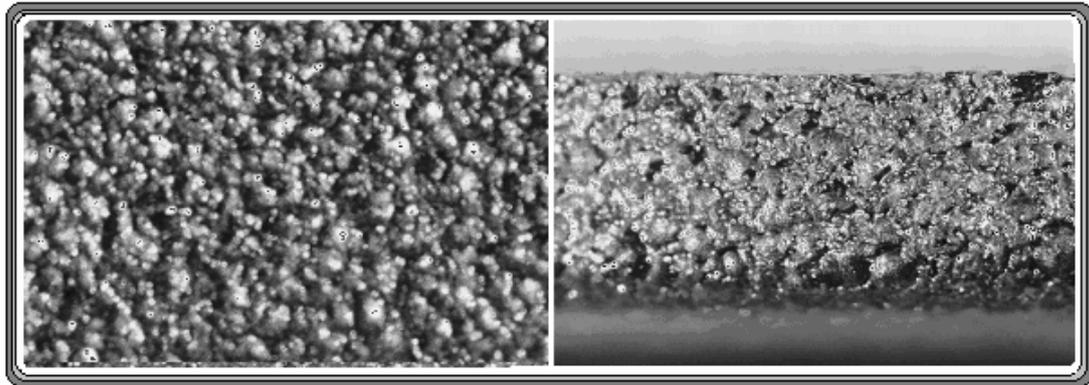


FIGURA 85. Macroscopía de la zona lateral de la cavidad erosionada de la **prueba 5** de Cobre electrolítico (izq) y de su superficie (der). Con un aumento de 32 X. la porosidad en esta prueba es mayor, su rugosidad es notoriamente grande y la calidad de su superficie está bien definida, en las dos partes.

### 4.3 MICROSCOPIA DE LAS SUPERFICIES

Con el fin de poder determinar algún cambio de la estructura en el material de las pruebas realizadas con los dos electrodos, se hizo una preparación metalográfica a muestras obtenidas de las placas electroerosionadas. Como en todo el trabajo, se dividieron en cada una de las pruebas que se realizaron con parámetros distintos. Una vez conseguida la microscopia, se procedió a capturar en fotografías la toma realizada.

El equipo utilizado es un microscopio óptico con un aumento de 200X.

En la FIGURA 86 y hasta la FIGURA 91, se observa que el tamaño de grano no cambia, aún cuando la zona analizada es la que genera la curva de la conicidad (Figura 88), el tamaño de grano permanece constante, y se observa que la composición de los elementos que la conforman es la misma. Como es un acero tipo AISI 1018, su estructura esta definida como una colonia de perlita en una matriz de ferrita. Se observó en todas las zonas de cada probeta, quedando claro que su composición es homogénea, incluso ya en las comparaciones con las probetas realizadas con cobre electrolítico y con grafito, se observa que no existe diferencia entre ellas.

En la FIGURA 90, se hizo una comparación con un aumento menor, a 100X, y los resultados al igual que en otros casos en los que se utilizó este aumento fue el mismo que para 200X. No se observa un cambio de grano, ni de tamaño, ni de forma, por lo que se concluye que el proceso de electroerosión aún en los casos extremos donde hubo un gran tiempo de maquinado, con los parámetros de desbaste mas grandes que puede aplicarse en la maquina usada, no afecta a la estructura del acero y que es independiente el tipo de electrodo usado ya que los resultados a nivel microscópico son los mismos. De igual manera, los resultados en cada una de las demás pruebas realizadas, los resultados no varían y siempre se tienen las características iguales, por lo que se puede generalizar que el proceso no afecta la microscopía del material trabajado.

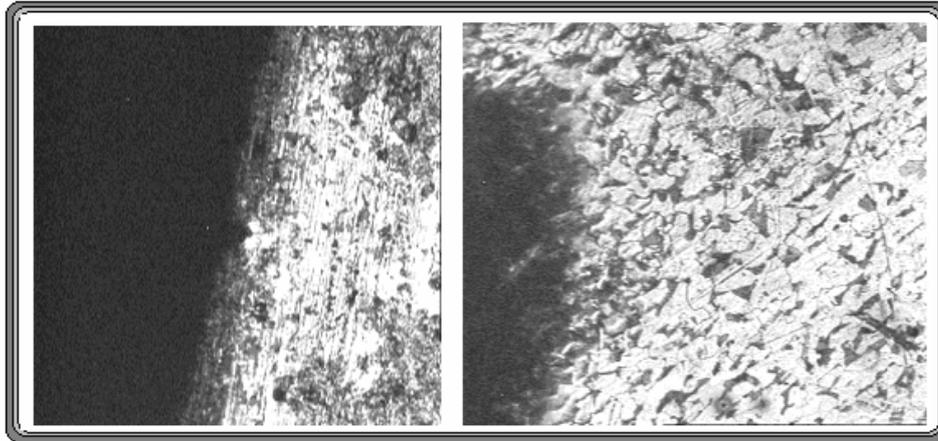


FIGURA 86. Microscopía de la **Prueba 2** de Cobre (izq) y Grafito (der) a 200X.

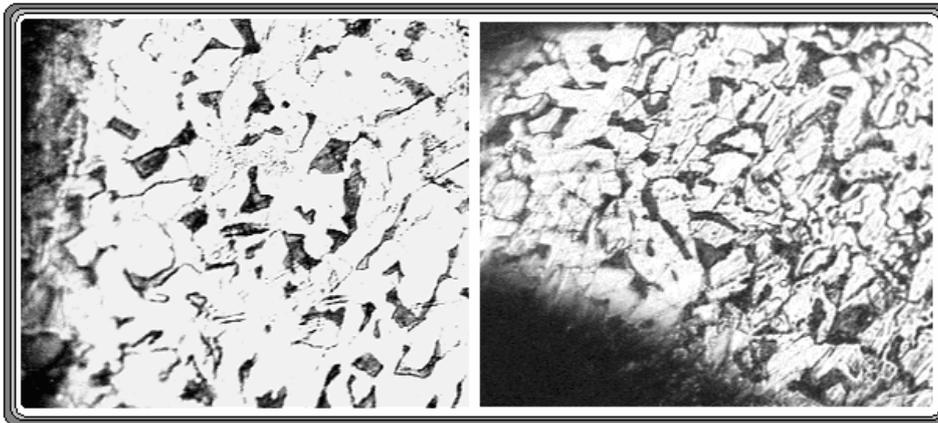


FIGURA 87. Microscopía de la **Prueba 4** de Cobre (izq) y Grafito (der) a 200X. Se observa que el tamaño de grano no cambia, además de que la forma del grano permanece constante, por lo que se puede decir que la estructura no es afectada por el proceso de electroerosión.

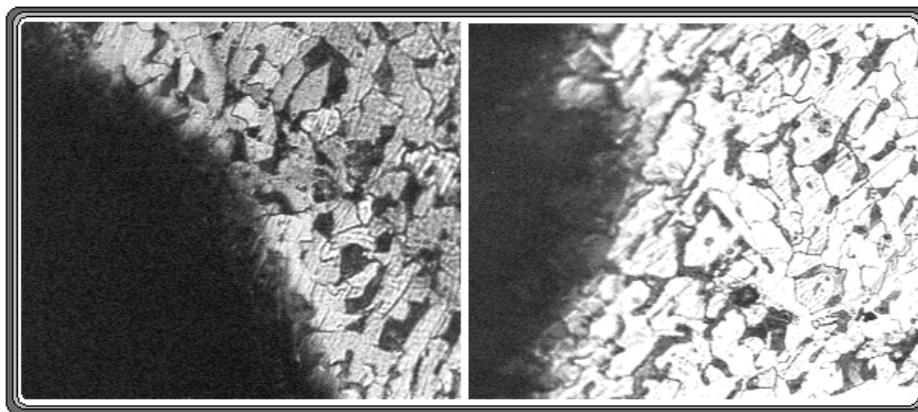


FIGURA 88. Microscopía de la **Prueba 6** de Cobre (izq) y Grafito (der) a 200X

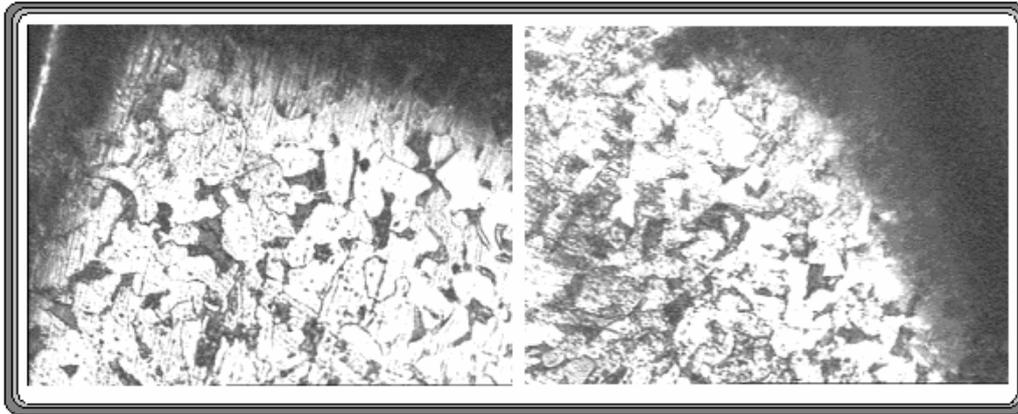


FIGURA 89. Microscopía de la Prueba 2 (izq) y 6-2 de Grafito (der) a 200X. Se observan estructuras iguales tanto en el tamaño de grano como de su composición.

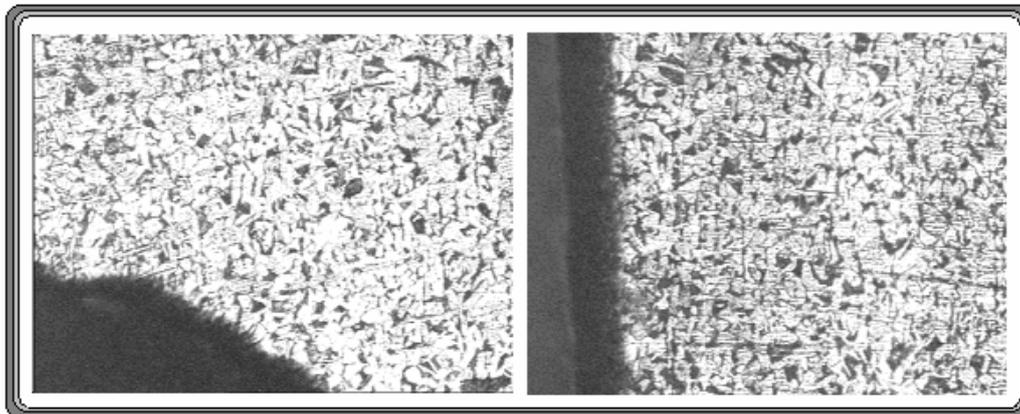


FIGURA 90. Microscopía de la Prueba 6-2 de Cobre (izq) y Grafito (der) a 100X. No existen cambios de estructura, y ambas pruebas tienen las mismas características y composición y tamaño de grano.

## 4.4 ANÁLISIS DE DUREZA

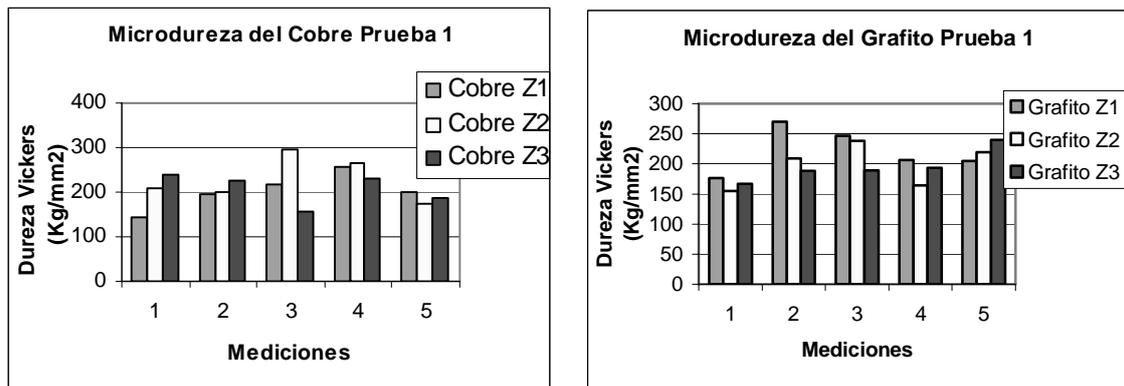
### 4.4.1 Microdureza

En el caso de la microdureza, se ha optado por analizar los resultados en cada una de las pruebas realizadas y considerando que las tablas generadas están en comparación los dos electrodos utilizados, se procedió al análisis para cada tabla obtenida.

#### Para la prueba 1.

En este caso en la zona 1, que es la zona más cercana a la superficie electroerosionada, el electrodo de Grafito se mantiene con una dureza mayor que la del Cobre pero en las dos zonas restantes (media y alejada de la zona de trabajo,) la probeta trabajada con el electrodo de Cobre tiene una dureza mayor.

En cuanto a la dureza del material con Cobre electrolítico existe una tendencia de ir de menos a mas, es decir, existe mayor dureza en la superficie erosionada y mientras más se aleja, mas disminuye. También existe otra tendencia, según los datos, la dureza es mayor en el extremo derecho y va decreciendo mientras más se acerca al extremo izquierdo; mientras que para el caso del Grafito la tendencia es la de aumentar conforme se acerca a la zona erosionada.



GRAFICA 9. Microdureza de los dos electrodos en cada prueba

### Para la prueba 2.

La dureza se comporta de una manera mas uniforme, pero la mayor dureza entre las dos probetas, es la que está generada por el electrodo de Grafito.

Hay puntos en que la dureza dió un valor muy disparado, pero en realidad sí existe una constante en los valores obtenidos. No se establece una relación y tampoco se puede definir que la dureza se comporte igual en una zona específica.

### Para la prueba 3.

En el caso de esta prueba, tanto la probeta generada por el electrodo de Grafito como la del Cobre, se comportan con una mayor dureza en la zona intermedia y se alternan las demás zonas. En este caso la dureza sigue sin una definición exacta de algún comportamiento en particular, aunque los valores mas altos de dureza se alcanzan casi todos por la prueba de Grafito.

### Para la prueba 4.

Comparando los datos obtenidos de las dos probetas, en la parte derecha predomina la dureza del Grafito pero en la zona izquierda los valores del Cobre son mayores. En el caso de la prueba de Cobre la parte más dura es en el centro y en la zona 1, que es la más cercana al área de trabajo y su zona mas blanda es parte derecha de la probeta.

Al igual que en el caso del Cobre, la zona con mayor dureza de la probeta generada por el electrodo de Grafito se encuentra en el centro de la probeta, aunque en este caso la dureza se mantiene con parámetros cercanos dando como resultado la mejor uniformidad de todas las muestras analizadas.

### Para la prueba 5.

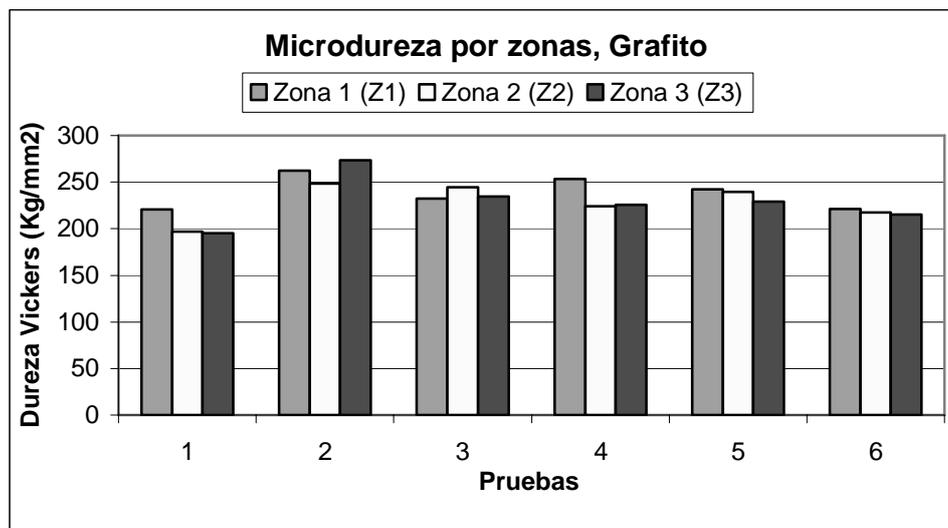
En este caso la prueba del Cobre manifiesta una mayor dureza al centro de la probeta y en la zona mas cercana a la superficie, su correspondiente de Grafito, no presenta una tendencia y los resultados dan zonas de variación alternada, distribuyendo los valores de dureza de forma diferente por cada medición.

### Para la prueba 6.

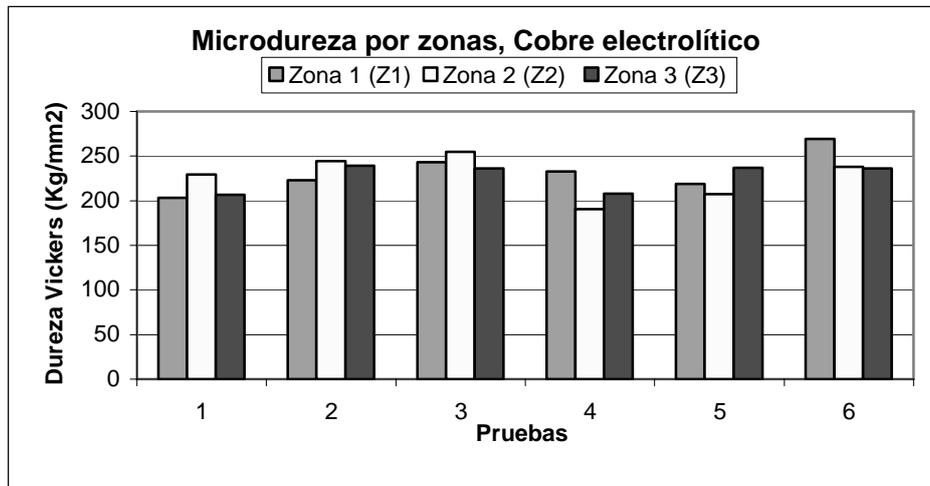
En la mayoría de las comparaciones entre los resultados de ambas pruebas, la que tiene mayor dureza es la probeta del Cobre, aunque los valores difieren en cuanto a zonas y, solo en algunas partes, el Grafito parece uniformizarse en su superficie pero luego se dispara con valores, o muy altos o muy bajos. El Cobre se mantiene en el lado izquierdo con valores altos de dureza pero tiende a perderlos en el lado derecho de la probeta.

### Generalidades.

En forma general el comportamiento de los resultados obtenidos con los dos electrodos se presenta en las siguientes tablas, donde los resultados experimentales se representan por los promedios de cada una de las pruebas.



GRAFICA 10. Microdureza de las zonas de la probeta para el **grafito**



GRAFICA 11. Microdureza de las zonas de la probeta para el **Cobre electrolítico**

#### 4.4.2 Dureza Rockwell

Para la dureza Rockwell, los valores son similares entre los casos de los dos electrodos, las variaciones entre cada zona son muy similares y en mas de una ocasión se dispararon, tanto a una menor como a una mayor dureza. Al analizar un material nuevo de acero AISI 1018, sin trabajo de electroerosión se encontró que los resultados eran parecidos a las demás placas trabajadas, por lo que se concluye que los valores de dureza en el material utilizado no son homogéneos, a la vez que no se presentan cambios en la superficie erosionada, por lo menos en esta escala.

Al ser la escala Rockwell C, una escala para muestras con mayor variación, los valores entonces, son admisibles y por lo tanto también sus diferencias. Por lo que se puede concluir que en esta escala, la dureza no se altera en las regiones de la probeta que no se trabajaron, mientras que en la zona trabajada, los resultados son inestables ya que mientras en alguna parte de la zona la dureza es mayor, en otra disminuye, tal y como se presenta en las demás zonas estudiadas; de esta manera se concluye que sucede lo mismo que en las otras partes por lo que la dureza no se altera y permanecen los valores promedios que toda la placa tiene.

#### 4.5 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN

Como se ha analizado, el electrodo fabricado con grafito, resuelve el problema del tiempo de maquinado, ya que se acelera el proceso de EDM, dando buenos resultados en las características de la cavidad generada. Con el fin de poder obtener buenos resultados pero con mejores tiempos de maquinado, se optó por realizar pruebas donde la programación de la maquina, se modificó en sus parámetros. Al programar la máquina para un desbaste, el tiempo de trabajo, es muy pequeño, pero el acabado es de una rugosidad muy alta, por lo que se optó por realizar la cavidad hasta un límite definido dejando dos décimas de milímetro para llegar a la profundidad deseada. Entonces se modificaron los parámetros, que son los que le corresponden a un acabado fino con una rugosidad baja y se terminó de maquinar, haciendo la cavidad en muy poco tiempo.

Al establecer este tipo de maquinado, surge la necesidad de saber si los resultados obtenidos son iguales a los de la prueba realizada de manera continua con los mismos parámetros en todo el trabajo. Los resultados obtenidos se comparan con los de la prueba continua. Ambas pruebas se realizaron con el mismo material, y se hicieron los mismos análisis para obtener resultados comparables entre sí.

En la siguiente comparación se hace un análisis de los resultados al trabajar un acero AISI 1018 en dos procesos de electroerosión, en busca de un mismo microacabado pero de dos formas distintas. Se usaron los parámetros de la prueba 2, que son los mismos utilizados para las pruebas hechas con los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico. Sin embargo para mejorar los tiempos de maquinado se buscó una segunda opción, basada en la rugosidad mayor, presentada en las diferentes pruebas ya realizadas. En la prueba 2, los datos tomados son los obtenidos anteriormente donde no hubo cambios ni variación de los parámetros.

En la nueva prueba que se denominó **prueba 6-2** (por la combinación de la prueba 6 con la 2), los parámetros utilizados son dos, los que corresponden a la operación de desbaste y los que se usaron para microacabado, en el caso de estos últimos solo se utilizó para un trabajo de dos décimas de milímetro, con el fin de darle a la operación de desbaste un mejor acabado.

Se presentan los resultados obtenidos y más adelante el manejo y análisis de dichos resultados. Como el objetivo es el de lograr un acabado con un menor tiempo de maquinado, la comparación de los resultados se hacen con los datos obtenidos en la prueba 2, para valorar cuánto se afecta el acabado al obtenido originalmente al hacer el proceso mas rápido pero con parámetros mas severos. Los datos usados son los de la tabla que generó las cavidades del trabajo en las demás partes del desarrollo experimental (TABLA 4), del capítulo 3.

TABLA 4. Programaciones de EDM, parámetros de entrada para el mecanizado.

Prueba	TS	TH	TON	DT	GAP
1	0.5	0	20	35	5
2	1	0	50	55	5
3	2	0	100	55	5
4	3	0	150	60	5
5	4	0	200	65	5
6	6	0	300	75	5

#### 4.5.1 Resultados de la prueba con Grafito.

Para la **prueba 2** los parámetros de trabajo quedan de la siguiente manera: TS = 1, TH = 0, TON = 50, DT = 55 Y GAP = 5. En esta erosión se obtuvieron los siguientes resultados:

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado (min)
1	40-170	0-3	0.66	88,31

Para la **prueba 6-2** los parámetros de trabajo en la parte de desbaste son TS = 6, TH = 0, TON = 300, DT = 75 Y GAP =5, y para la parte de microacabado son TS = 1, TH = 0, TON = 50, DT = 55 Y GAP =5. Obteniendo los siguientes resultados:

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste total del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado (min)	Zmáx. (mm)
1(desbaste)	40-170	0-12		23,34	1.8
2(microacabado)	40-170	0-3	0.03	29,0	0.2
totales	40-170	variable	0.03	52,34	2.0

#### Dimensiones de la huella.

	PRUEBA 2	PRUEBA 6-2	DIFERENCIA
Dint.(mm)	25.38	25.4	0.02
Dext.(mm)	25.45	25.8	0.35

#### **4.5.2 Resultados de la prueba con Cobre electrolítico.**

Para la **prueba 2** los parámetros de trabajo quedan de la siguiente manera: TS = 1, TH = 0, TON = 50, DT = 55 Y GAP =5. En esta parte se obtuvieron los siguientes resultados:

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado (min)
1	30-170	0-1	1.35	368

Para la **prueba 6-2** los parámetros de trabajo en la primera parte son los siguientes: TS = 6, TH = 0, TON = 300, DT = 75 Y GAP =5, y para la segunda parte de microacabado son: TS = 1, TH = 0, TON = 50, DT = 55 Y GAP =5. Obteniendo los resultados que se listan a continuación:

Evento	Voltaje (Volts)	Corriente (Amp)	Desgaste del electrodo.(mm)	Tiempo de maquinado (min)	Zmax. (mm)
1(desbaste)	40-170	0-15		17,33	1.8
2(microacabado)	20-170	0-3	0.03	15,35	0.2
totales	variable	variable	<b>0.03</b>	<b>33.08</b>	<b>2.0</b>

#### Dimensiones de la huella.

	PRUEBA 2	PRUEBA 6-2	DIFERENCIA
Dint.(mm)	25.4	25.5	0.1
Dext.(mm)	25.52	25.7	0.18

### 4.5.3 Análisis de las muestras.

Los resultados que se obtienen de las pruebas, dan la capacidad de analizar y decidir cual es la forma más viable de ejecución en un trabajo de electroerosión. Se han predispuesto los análisis de la misma forma que en el estudio anterior y se ha colocado una conclusión general al final de las comparaciones.

#### **Tiempo de maquinado.**

En el tiempo de maquinado, como ya se había pronosticado, fue mucho mas corto en la prueba 6-2 para todos los casos. Con el Grafito se bajó el tiempo de 88,31 minutos a 52,34 minutos aproximadamente un 40% del tiempo utilizado de manera continua con los parámetros de la prueba 2. Con el electrodo de cobre electrolítico que es el caso donde el tiempo de maquinado fue bastante alto se tiene 368 minutos para la prueba 2 y 33,08 para la prueba 6-2, reduciendo hasta mil por ciento el tiempo de maquinado en esta prueba.

#### **Rugosidad.**

La comparación de la rugosidad se adaptó de tal manera que las primeras medidas tomadas para las pruebas de Cobre y Grafito para el microacabado (prueba 2), se repitieron para obtener los valores con los mismos parámetros y lograr una comparación más directa. Los parámetros del rugosímetro utilizados fueron los siguientes: rango de 50 X 5 y longitud de prueba de 0.8 mm. Las medidas se realizaron a lo largo de la cavidad erosionada para tener muestras de la huella en cada una de las pruebas, obteniendo los siguientes resultados:

<b>Grafito</b>	<b>Grafito</b>	<b>Cobre electrolítico</b>	<b>Cobre electrolítico</b>
Prueba 2	Prueba 6-2	Prueba 2	Prueba 6-2
4.2	4.2	2.0	3.7
4.2	4.2	2.2	3.2
4.2	3.7	2.7	3.7
4.5	2.7	2.7	3.0
3.7	3.5	2.0	3.7
4.5	3.5	2.2	3.7
4.0	3.7	2.5	3.7
4.0	3.2	2.7	3.5

#### **Dureza.**

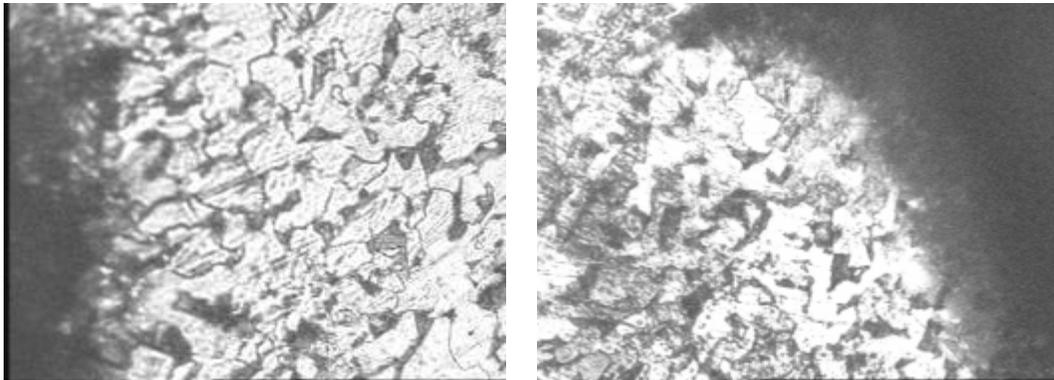
Las pruebas hechas a las muestras obtenidas de la metalografía están tomadas con un Durómetro Rockwell, marca Misawa Seiki Seisakusho. Escala: Rockwell B, carga: 100 Kg. y con penetrador de bola de 1/16" de diámetro. Recordando las zonas de la dureza en las probetas (FIGURA 64), se ubica la zona S1 en la proximidad de la cavidad erosionada, sin llegar a la periferia de esta, la zona S2 como la parte mas alejada de la probeta donde se efectuó el trabajo de electroerosión y la zona Sint es la zona erosionada o superficie de la huella, todas ellas medidas en la escala Rockwell B (RB)

**Prueba 2, Grafito.**

Medición	S1 (RB)	S2 (RB)	Sint (RB)	S1 (RB)	S2 (RB)	Sint (RB)
1	69.5	68.5	65	41	39	40.5
2	71	70	74	43	41.5	41
3	73	72.5	78	42	40	39.5
4	70.5	72	74	40	40.5	42.5
5	71.5	70	67.5	40	43	44.5

**Prueba 6-2, Grafito.****Prueba 2, Cobre.**

Medición	S1 (RB)	S2 (RB)	Sint (RB)	S1 (RB)	S2 (RB)	Sint (RB)
1	70	73	71.5	39	29	42
2	73	71	70	35	39	39
3	73.5	72.5	71.5	32	35	39
4	72.5	71	67.5	39	36.5	44.5
5	71.5	72.5	73.5	40	41	38

**Prueba 6-2, Cobre****Microscopía**FIGURA 91. Microscopía de la **Prueba 2 de Grafito** (izq.) y **prueba 6-2** (der.) a 200X**4.5.4 Conclusiones para la prueba 6-2**

La elección de los parámetros proporciona un mejor acabado superficial con un adecuado tiempo de maquinado, una rugosidad deseable, diferencias menores en cuanto a la repetibilidad de dimensiones y con una alteración mínima en sus propiedades y características. Efectivamente el proceso de electroerosión utilizado (Prueba 6-2), mejora notablemente el tiempo de trabajo. Los tiempos se reducen significativamente, además que las dimensiones no varían mucho y en las pruebas de dureza, los resultados permanecen como en la prueba 2 en lo que es el electrodo de Grafito, la prueba de dureza muestra que esta propiedad se altera de manera drástica para el caso del electrodo de Cobre electrolítico, ya que alcanzan hasta el cincuenta por ciento de pérdida de dureza. En el caso de la rugosidad para el caso del Grafito permanece constante, pero en el caso del Cobre electrolítico, esta propiedad si se modifica, se endurece a más de la mitad en la mayoría de las ocasiones.

#### **4.5.5 Análisis general de los electrodos para trabajos con EDM**

##### **Al trabajar con electrodos de Cobre electrolítico:**

- Para una corriente de descarga menor a los 3 Amperes el electrodo que se desgasta más longitudinalmente es el de Cobre electrolítico
- Se requiere de una corriente de descarga menor a 4 Amperes al trabajarse con electrodos de Cobre electrolítico.
- Para el Cobre electrolítico la conicidad es mucho menor que en el caso del Grafito, sin embargo, esta conicidad presenta un diámetro interior casi constante después de los 162 minutos de maquinado, así el ángulo en la conicidad se empieza a mantener constante.
- Para cualquier tiempo de maquinado, se obtiene un mejor acabado superficial al trabajarse con electrodos de Cobre electrolítico. Al hacer una comparación de rugosidades de los dos tipos de electrodos con respecto a la muestra patrón del fabricante, el mejor acabado superficial lo dá el electrodo de Cobre electrolítico, acercándose al patrón establecido.
- Existe un mayor incremento en la temperatura en el fluido dieléctrico cuando se trabaja con electrodos de Cobre electrolítico, esto es debido a que los maquinados son mas lentos, el tiempo de maquinado se alarga y con ello el uso del dieléctrico es utilizado mucho mas tiempo.
- Por debajo de los 35 minutos el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico

##### **Al trabajar con electrodos de Grafito:**

- Para un mayor tiempo de maquinado el electrodo de Cobre electrolítico se desgasta longitudinalmente mas que con grafito, aunque el mayor punto de fusión lo tiene el grafito. Cuando el tiempo de maquinado disminuye, se conserva la tendencia hasta por debajo de los 35min.
- Para una corriente de descarga superior a los 4 Amperes el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico
- El Tiempo de maquinado disminuye al trabajar con electrodos de Grafito.
- Con electrodos de Grafito, se presenta el fenómeno de conicidad, sin embargo al ir aumentando el tiempo de maquinado la diferencia entre el diámetro interior va disminuyendo con respecto al diámetro exterior. Por lo que se puede considerar que el ángulo en la conicidad va cambiando al ir aumentando el tiempo.
- La dureza es menor, para los trabajos hechos con el electrodo de Grafito.

## CAPITULO 5.

### CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

#### 5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el proceso de electroerosión por penetración en acero AISI 1018 con electrodos de Grafito y de Cobre electrolítico. Las pruebas realizadas a las muestras obtenidas mediante el proceso, presentan importantes conclusiones.

1. En el caso del análisis de las dimensiones de los diámetros se aprecia mediante las tablas proporcionadas que mientras los parámetros de electroerosión aumentan, las cavidades van aumentando en sus dimensiones, los diámetros entre un evento y otro de la misma prueba casi son constantes lo que nos da un resultado bastante aceptable de acuerdo a las tolerancias que puede manejar la máquina, pero donde varía es entre prueba y prueba, es mas notorio en el caso del Cobre electrolítico donde las variaciones entre la **prueba 1** y la **Prueba 6** es de casi 0.3 mm. El Grafito marcó diferencias de menos de 0.2 mm, lo que permite decir que en este caso el comportamiento del material debe estar ligado también al tiempo de maquinado que es consecuencia de los parámetros de EDM.
2. El resultado que se obtiene de la cavidad erosionada son dos diámetros diferentes; un diámetro exterior y un diámetro interior, el primero mayor al segundo, a este fenómeno se le llama conicidad. Este fenómeno es poco perceptible cuando se realiza un tiempo de maquinado relativamente bajo. Sin embargo, para las pruebas que se hicieron con el electrodo de Cobre, se observa que para menores tiempos de maquinado se presenta una conicidad mayor.
3. Cuando el diámetro interior es menor al diámetro exterior de la cavidad, existe un mayor desgaste en los electrodos, sin embargo al disminuirse el diámetro interior y aproximarse al diámetro exterior, el desgaste longitudinal tiende a estabilizarse de forma constante para los dos tipos de electrodos.

4. La rugosidad marca una propiedad principal en este estudio, ya que de ello depende obtener los mejores condiciones de trabajo y de eficiencia de la máquina de electroerosión, de hecho el objetivo al cambiar los diferentes parámetros a la programación de la máquina es el de obtener el acabado deseable, sabiendo de antemano que un acabado con una rugosidad menor tendrá mas tiempo de trabajo. En este análisis se encontró que el Cobre electrolítico da mejores acabados que el Grafito y es mas evidente en las pruebas donde el tiempo de trabajo es mayor. La rugosidad entre eventos es muy parecida lo que confirma la calidad de la máquina sin pretender que estos valores determinen la conclusión acerca del análisis.
5. En la microdureza en ocasiones la probeta trabajada con el electrodo de Cobre electrolítico da valores superiores que al caso del Grafito, pero en muchas más el caso es inverso, tampoco se repite mucho la misma dureza en toda la zona de ambos electrodos. En una gran mayoría, la dureza del caso del electrodo de Grafito es menor que en el del Cobre electrolítico. En la prueba de microdureza Vickers para ambos electrodos, no hay una repetición de dureza en toda la zona, al hacer una prueba de dureza de una placa igual a la que se trabajaron las probetas, se encontró que la dureza en toda la placa no es constante por lo que la característica de uniformidad de dureza, no es propia de un material AISI 1018 de uso comercial.
6. La dureza es mayor en la zona afectada por el trabajo de electroerosión que en la zona donde no se trabajó, este patrón se repite la mayoría de las veces para ambos casos.
7. Para la dureza Rockwell, ésta es semejante a la microdureza Vickers, sus valores son parecidos en los dos electrodos, las variaciones entre las zonas son muy bajas y repetitivas, y como la escala en la que se mide es para muestras con mayor variación, entonces los valores obtenidos entran en el rango permisible, por lo que se puede afirmar que la dureza es relativamente cercana y por lo tanto casi la misma en todas las zonas.
8. Para hacer una evaluación de la zona trabajada y de los posibles cambios sufridos por la temperatura y las descargas se hizo una serie de análisis macroscópicos, donde se observó que las zonas cercanas al área de trabajo no se afectaron térmicamente, también se pudo comprobar que el electrodo de grafito define más la huella del electrodo cuando los parámetros de trabajo son para acabados finos, pero cuando se trata de los parámetros de las pruebas 3 a la 5 ( trabajos con valores mas severos) la definición y por lo tanto una mejor reproducción del electrodo es por parte de las pruebas realizadas con Cobre electrolítico, tal como lo muestran los resultados del análisis dimensional de los diámetros. Macroscópicamente los acabados de la probeta de Cobre electrolítico están mas definidos pero el acabado es mas burdo que su similar de electrodo de Grafito.

9. Difícilmente se podrá encontrar que un acabado superficial cumpla con una rugosidad baja y que sus tiempos de maquinado sean cortos, ya que estas características van ligadas a parámetros distintos, es decir, si se desea un acabado de una rugosidad fina, se deben establecer parámetros que no afecten agresivamente a la superficie a erosionar, si por el contrario, se necesita un tiempo corto para obtener la cavidad sin importar demasiado el acabado final, se pueden usar parámetros que erosionen de manera rápida aunque con ello dimensiones y acabado se afecten.
10. Con este trabajo se evaluó que las zonas cercanas al área de electroerosión no se ven afectadas térmicamente, aún con los parámetros de mayor choque eléctrico, así sucede también con la dureza, donde por los resultados se puede apreciar que se endurece mínimamente la zona de trabajo, esto sin alterar sus características y propiedades.
11. En la mayoría de los casos, el electrodo de Grafito presenta las ventajas de proporcionar una mejor calidad de maquinado, debido a que las variaciones dimensionales en la electroerosión son menores cuando los parámetros no son agresivos al trabajar, además de una mejor repetibilidad de las cavidades y que sus tiempos de maquinado son menores que los del Cobre.
12. En cuestión de desgaste del electrodo, el de Grafito tiene una menor vida útil, por lo que al ser considerado para un molde debe considerarse que su duración será mucho menor que el Cobre.
13. Si se tratara de determinar un trabajo que ofrezca las mejores características, la mejor opción es la del electrodo de Grafito trabajado en la **prueba 2**, ya que su tiempo de maquinado es un poco menor a 90 minutos, su dureza se mantiene en diferencias muy aceptables, el desgaste del electrodo aunque varía, no sobrepasa el milímetro por cada evento, aunque su rugosidad esta por arriba que la del Cobre electrolítico pero solo en un promedio de 3 micras. En cuanto a las dimensiones, son casi iguales entre las piezas trabajadas con los dos electrodos. Pero donde marca diferencia es en el tiempo de maquinado donde va desde una cuarta hasta casi una quinta parte del tiempo que necesita el cobre electrolítico para lograr generar la cavidad de este trabajo.
14. En base a las macrografías y microestructuras se concluye:
  - Que se observan porosidades propias de su superficie en todas las pruebas realizadas, y mientras mayores son los parámetros de entrada, mas grandes son los poros.
  - Existen también inclusiones y defectos en las pruebas realizadas que se incrementan conforme la rugosidad es mayor.
  - No cambian las propiedades del material y su estructura al ser sometidas al proceso de electroerosión por penetración.

## 5.2 Comentarios del proceso de EDM

1. Generalmente se emplean electrodos de Grafito, que por tener una elevada temperatura de vaporización es más resistente al desgaste. No obstante, este material es frágil, por lo que la manipulación de los electrodos debe ser muy cuidadosa.
2. La cantidad de corriente depende del número de transistores activados en el banco de trabajo, porque cada transistor lleva solo determinada corriente, y la duración del pulso (chispa) por el ajuste del temporizador para encender y apagar los transistores.
3. Mientras más sea la energía en un pulso (esto es, mientras más corriente se suministre al arco), más grande será el desperdicio arrancado de la pieza de trabajo; demasiada energía puede crear fisuras y dañan la pieza además de que es ineficiente.
4. La polaridad inversa con la pieza de trabajo negativa mostrada en la FIGURA 31 es de uso común para el desbaste, pero la polaridad directa de una pieza de trabajo positiva se prefiere para algunas aplicaciones, especialmente para el acabado.
5. Al aumentar la frecuencia, el acabado superficial mejora, debido a la reducción de energía por chispa.
6. Una operación demasiado severa en el EDM puede dejar microgrietas en la superficie que se desarrollan y propagan bajo esfuerzos. Las superficies hechas por el EDM son bastantes duras y resistentes al desgaste pero frágiles y la resistencia a la fatiga puede hacer que el material se corte más que en una mitad.
7. Los esfuerzos pueden relevarse por recocido y las superficies afectadas pueden removerse por rectificado cuidadosos, lapeado o fresado electroquímico.

## 5.3 Comentarios del desarrollo de las pruebas

1. Para el proceso de electroerosión, se hizo una serie de pruebas preeliminares para obtener la profundidad de 2mm como la ideal para el desarrollo del estudio. Para lograr este objetivo, se realizaron series de erosiones desde 0.5mm hasta 5mm, que son profundidades aceptadas en la placa utilizada de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Al analizar las diferentes muestras dentro de este rango, se encontró un comportamiento lineal en cuanto a formas y características de la huella, desde los tiempos de maquinado, hasta la forma cónica que se genera en la base de la cavidad. Al estudiar la profundidad de 2mm se pudo obtener las características que fácilmente se podían apreciar y definidas de tal manera que su comparación con las otras pruebas era bastante evidente, sin la necesidad de realizar trabajos mas tardados en otras profundidades.

2. También se realizaron pruebas para obtener acabados superficiales mas finos y otros mas rugosos, pero los tiempos para los primeros resultaron tan altos que sobrepasaban las 38 horas continuas de trabajo, tiempos que no eran favorables para el estudio. En el caso de las pruebas con parámetros mas severos con una rugosidad alta, los tiempos fueron muy cortos lo que imposibilitaba mediciones con características constantes y bien definidas, de alguna manera se obtuvieron buenos resultados pero se tenia que recurrir a profundidades mayores lo que dificultaba su comparación con las pruebas definidas de 2mm.

## BIBLIOGRAFIA

1. Advanced Methods of Machining, J. A. Machining, Editorial Chapman and Hall, 1988
2. Manufactura Ingeniería y tecnología, Serope Kalpakjian and Steven R. Schmind, 2001
3. Principios de Ingeniería de Manufactura, Stewart C. Black, Vick Chiles, A. J. Lissaman, S. J. Martin, Compañía Editorial Continental, 1999
4. Manual de la máquina de electroerosión Agie Engemaq NC 400
5. Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros, Lawrence E. Doyle, Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A., 1985
6. Procesos de Manufactura Versión SI, B. H. Amstead, Phillip F. Estwald, Myron L. Begeman, Cia. Editorial Continental, S. A. de C. V. México, 1981
7. Electromecanizado; electroerosión y mecanizado electroquímico, Pere Molera Sola. Edit. Marcombo, Colección Productiva. Barcelona, 1989
8. Mecanizado por chispas y por electroerosión, Gastón Clerc, Editorial Cedel, Barcelona, 1966
9. [www.technosystem.com](http://www.technosystem.com)
10. [www.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Practica%20WEDM.pdf](http://www.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Practica%20WEDM.pdf) –
11. [www.emac.com.mx/herramienta/Ona](http://www.emac.com.mx/herramienta/Ona)
12. [www.metalmecanica.com](http://www.metalmecanica.com)
13. [es.wikipedia.org/wiki/Electroerosión](http://es.wikipedia.org/wiki/Electroerosión)
14. [www.fi.uba.ar/materias/6727/electroerosion.pdf](http://www.fi.uba.ar/materias/6727/electroerosion.pdf)
15. [www.ona-electroerosion.com/](http://www.ona-electroerosion.com/)
16. [www.anser.com.ar/electroerosion.htm](http://www.anser.com.ar/electroerosion.htm)
17. [www.metalunivers.com](http://www.metalunivers.com)
18. [www.prometal.com.mx](http://www.prometal.com.mx)
19. [www.afm.es](http://www.afm.es)
20. [www.eurotecnica.es](http://www.eurotecnica.es)

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Actividad de la EDM con el paso del tiempo.....	16
FIGURA 2 Principio básico de maquinado por electroerosión (EDM).....	18
FIGURA 3. Elementos del proceso de Electroerosión.....	19
FIGURA 3b. Categorías de máquinas de electroerosión.....	23
FIGURA 3c. Movimientos del electrodo.....	24
FIGURA 4. Electroerosión por hilo.....	26
FIGURA 4a. Ejemplo de una pieza taladrada por EDM.....	28
FIGURA 4b. Máquina de electroerosión equipada con control numérico para Posicionamiento, generador y control unitario.....	32
FIGURA 5. Desgaste típico de electrodo en un componente previamente taladrado.....	34
FIGURA 6. Sistema de sujeción de la máquina de Electroerosión.....	35
FIGURA 7. Portaelectrodos con chuck.....	36
FIGURA 8. Portaelectrodos de base plana.....	36
FIGURA 9a). Portaelectrodos con rosca interna de acero 1018 templados fabricados por CNC.....	37
FIGURA 9b). Portaelectrodos con rosca interna de acero templado 1018 maquinados por CNC.....	37
FIGURA 10. Portaelectrodos de montaje en escuadra.....	37
FIGURA 11. Mecanismo de descarga en EDM (Después de Meek y de Craggs, 1953.....	41
FIGURA 12. Configuración del electrodo por EDM.....	42
FIGURA 13. Circuito de relajación RC.....	43
FIGURA 14. Variación en el voltaje con respecto del tiempo en el capacitor.....	44
FIGURA 15. Generalización del circuito de relajación.....	47

FIGURA 16. Rapidez de remoción de metal como función de capacitancia (Según Rudorff); electrodo de latón y pieza de trabajo de acero endurecido.....	48
FIGURA 17. Comparación de características de descargas de igual energía producidas por generador RC y generador transistorizado.....	49
FIGURA 18. Circuito generador de pulsos transistorizado básico y características de descargas.....	50
FIGURA 19. Principio de generación de isopulsos (cortesía Charmilles) y características de descargas.....	51
FIGURA 20. Variación en el voltaje con respecto del tiempo en el capacitor.....	52
FIGURA 21. Formación de grandes picos de corriente al generarse la chispa.....	53
FIGURA 22. Forma de onda típica de tiempo para el generador controlador de pulsos.....	54
FIGURA 23. Voltaje típico y características actuales para el generador de pulso controlado.....	54
FIGURA 24. Circuito básico de fuente de poder.....	57
FIGURA 25. Circuito RC.....	57
FIGURA 26. Generador de pulso rotatorio.....	58
FIGURA 27. Controlador de pulso (tubo de vacío).....	59
FIGURA 28. Control oscilador de pulso.....	60
FIGURA 29. Tubos de vacío y circuito transformado.....	61
FIGURA 30. Tubos de vacío (dos fuentes de poder).....	62
FIGURA 31. Circuito transistor de pulsos.....	63
FIGURA 32. El APos-Robot, máquina fabricada por Heun.....	64
FIGURA 33. Electrodo generados por CAD/CAM.....	70
FIGURA 34. Máquina de electroerosión Agie Engemag EDM 440 NC.....	71
FIGURA 35. Esquema frontal de los componentes más representativos de la Máquina de electroerosión Agie Engemag EDM 440 NC.....	72

FIGURA 36. Esquema posterior de los componentes más representativos de la Máquina de electroerosión Agie Engemag EDM 440 NC.....	72
FIGURA 37. Panel de control y generador.....	73
FIGURA 38. Esquema representativo del Panel de control y generador.....	74
FIGURA 39. Control S-BOX.....	74
FIGURA 40. Sistema de sujeción del portaelectrodo.....	75
FIGURA 41. Bandeja de trabajo.....	76
FIGURA 42. Salidas de lavado y control de nivel del dieléctrico.....	77
FIGURA 43. Bomba del fluido dieléctrico.....	78
FIGURA 44. Esquema de la mesa de coordenadas.....	79
FIGURA 45. Volante del eje Y y freno manual.....	79
FIGURA 46. Llave selectora de polaridad.....	80
FIGURA 47. Llave pulsadora de emergencia.....	80
FIGURA 48. Amperímetro y Voltímetro.....	81
FIGURA 49. Control de regulación del gap y control de regulación de la sensibilidad del servo.....	82
FIGURA 50. Diodos de señalización de la fuente de erosión.....	83
FIGURA 51. Teclado de operación.....	83
FIGURA 52. Diodos de señalización del panel del generador.....	85
FIGURA 53. Portaeléctrodos fabricados por CNC.....	85
FIGURA 54. Dimensiones de los portaeléctrodos.....	86
FIGURA 55. Centrado de la pieza, primer punto de referencia.....	87
FIGURA 56. Centrado de la pieza, segundo punto de referencia.....	87
FIGURA 57. Eléctrodos cilíndricos de grafito de 1 pulgada de diámetro.....	90
FIGURA 58. Preparación de una prueba con el electrodo de grafito.....	92

FIGURA 59. Cavidad obtenida después del proceso de electroerosión.....	101
FIGURA 60. Rugosímetro electromecánico SURFTEST – 402.....	104
FIGURA 61. Preparación de la prueba de microdureza.....	108
FIGURA 62. Zonas en la probeta sometidas a microdureza Vickers.....	109
FIGURA 63. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 3</b> de Cobre.....	113
FIGURA 64. Ubicación de las indentaciones en las muestras.....	113
FIGURA 65. Macroscopía la superficie erosionada de la <b>prueba 1</b> de grafito.....	115
FIGURA 66. Macroscopía la superficie erosionada de la <b>prueba 2</b> de grafito. ....	115
FIGURA 67. Macroscopía la superficie erosionada de la <b>prueba 3</b> de grafito. ....	115
FIGURA 68. Macroscopía la superficie erosionada de la <b>prueba 4</b> de grafito. ....	116
FIGURA 69. Macroscopía la superficie erosionada de la <b>prueba 5</b> de grafito. ....	116
FIGURA 70. Macroscopía la superficie erosionada de la <b>prueba 6</b> de grafito. ....	116
FIGURA 71. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 1</b> de Cobre.....	117
FIGURA 72. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 2</b> de Cobre.....	117
FIGURA 73. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 3</b> de Cobre.....	117
FIGURA 74. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 4</b> de Cobre.....	118
FIGURA 75. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 5</b> de Cobre.....	118
FIGURA 76. Macroscopía de la parte lateral erosionada de la <b>prueba 5</b> de Cobre.....	118
FIGURA 77. Macroscopía de la parte lateral erosionado de la <b>prueba 3</b> de Grafito.....	119
FIGURA 78. Macroscopía de la parte lateral erosionado de la <b>prueba 6</b> de Cobre.....	119
FIGURA 79. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 1</b> de Grafito.....	130
FIGURA 80. Macroscopía de la de la zona final de la <b>prueba 3</b> de Grafito.....	131
FIGURA 81. Macroscopía de la superficie erosionada de la <b>prueba 4</b> de Grafito.....	132

FIGURA 82. Macroscopía de la de la zona final de la <b>prueba 5</b> de Grafito.....	132
FIGURA 83. Macroscopía de la zona lateral de la <b>prueba 5</b> de Grafito con Cobre.....	133
FIGURA 84. Macroscopía de la zona lateral de la cavidad de la <b>prueba 6</b> de Cobre.....	133
FIGURA 85. Macroscopía de la zona lateral de la cavidad de la <b>prueba 5</b> de Cobre.....	134
FIGURA 86. Microscopía de la <b>Prueba 2</b> de Cobre y Grafito a 200X.....	135
FIGURA 87. Microscopía de la <b>Prueba 4</b> de Cobre y Grafito a 200X.....	135
FIGURA 88. Microscopía de la <b>Prueba 6</b> de Cobre y Grafito a 200X.....	135
FIGURA 89. Microscopía de la <b>Prueba 6-2</b> de Cobre y Grafito a 100X.....	136
FIGURA 90. Microscopía de la <b>Prueba 2</b> y <b>6-2 de Grafito</b> a 200X.....	136
FIGURA 91. Microscopia de la <b>Prueba 2</b> de Grafito y <b>prueba 6-2</b> a 200X.....	143

## INDICE DE GRÁFICAS

GRAFICA 1. Análisis comparativo para cada prueba al desgaste del electrodo de Grafito y Cobre electrolítico respecto a el Tiempo de maquinado.....	122
GRAFICA 2. Análisis comparativo para cada prueba en el Desgaste del electrodo de Grafito y Cobre electrolítico con respecto a la Corriente de descarga.....	123
GRAFICA 3. Análisis comparativo del Tiempo de maquinado con respecto a la Corriente de descarga para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.....	124
GRAFICA 4. Análisis del Incremento de Temperatura del fluido dieléctrico para cada prueba con electrodo de Grafito y Cobre electrolítico.....	125
GRAFICA 5. Análisis comparativo de la Rugosidad promedio (Ra) con respecto al Tiempo de maquinado para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.....	126
GRAFICA 6. Análisis comparativo de la Rugosidad (Ra) para los electrodos de Grafito, Cobre electrolítico y de la muestra patrón del fabricante.....	127
GRAFICA 7. Análisis comparativo en el Desgaste de los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico con respecto a los Diámetros de la cavidad erosionada.....	128
GRAFICA 8. Análisis comparativo de los Diámetros de la cavidad erosionada con respecto al Tiempo de maquinado para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.....	129
GRAFICA 9. Microdureza de los dos electrodos en cada prueba.....	137
GRAFICA 10. Microdureza de las zonas de la probeta para el <b>grafito</b> .....	138
GRAFICA 11. Microdureza de las zonas de la probeta para el <b>Cobre electrolítico</b> .....	139

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de dieléctricos de hidrocarburos.....	39
Tabla 2. Ventajas y desventajas de algunos circuitos de fuentes de poder.....	56
Tabla 3. Comparación de puntos de fusión de materiales utilizados en EDM.....	91
Tabla 4. Programaciones de EDM, parámetros de entrada para el mecanizado.....	97
TABLA 5. Resultados del mecanizado, <b>prueba 1</b> con electrodo de Grafito.....	97
TABLA 6. Resultados del mecanizado, <b>prueba 2</b> con electrodo de Grafito.....	97
TABLA 7. Resultados del mecanizado, <b>prueba 3</b> con electrodo de Grafito.....	98
TABLA 8. Resultados del mecanizado, <b>prueba 4</b> con electrodo de Grafito.....	98
TABLA 9. Resultados del mecanizado, <b>prueba 5</b> con electrodo de Grafito.....	98
TABLA 10. Resultados del mecanizado, <b>prueba 6</b> con electrodo de Grafito.....	98
TABLA 11. Resultados del mecanizado, <b>prueba 1</b> con electrodo de cobre electrolítico.....	99
TABLA 12. Resultados del mecanizado, <b>prueba 2</b> con electrodo de cobre electrolítico.....	99
TABLA 13. Resultados del mecanizado, <b>prueba 3</b> con electrodo de cobre electrolítico.....	99
TABLA 14. Resultados del mecanizado, <b>prueba 4</b> con electrodo de cobre electrolítico.....	99
TABLA 15. Resultados del mecanizado, <b>prueba 5</b> con electrodo de cobre electrolítico....	100
TABLA 16. Resultados del mecanizado, <b>prueba 6</b> con electrodo de cobre electrolítico.....	100
TABLA 17. Resultados de la variación de las diferencias del diámetro después del proceso de electroerosión con electrodo de <b>Grafito</b> .....	102
TABLA 18. Resultados de la variación de las diferencias del diámetro después del proceso de electroerosión con electrodo de <b>Cobre electrolítico</b> .....	102
TABLA 19. Comparación de la rugosidad (Ra) para cada electrodo, <b>prueba 1</b> .....	104
TABLA 20. Comparación de la rugosidad (Ra) para cada electrodo, <b>prueba 2</b> .....	105
TABLA 21. Comparación de la rugosidad (Ra) para cada electrodo, <b>prueba 3</b> .....	105

TABLA 22. Comparación de la rugosidad (Ra) para cada electrodo, <b>prueba 4</b> .....	106
TABLA 23. Comparación de la rugosidad (Ra) para cada electrodo, <b>prueba 5</b> .....	106
TABLA 24. Comparación de la rugosidad (Ra) para cada electrodo, <b>prueba 6</b> .....	107
TABLA 25. Comparación de la microdureza (HV) para cada electrodo, <b>prueba 1</b> .....	109
TABLA 26. Comparación de la microdureza (HV) para cada electrodo, <b>prueba 2</b> .....	110
TABLA 27. Comparación de la microdureza (HV) para cada electrodo, <b>prueba 3</b> .....	110
TABLA 28. Comparación de la microdureza (HV) para cada electrodo, <b>prueba 4</b> .....	111
TABLA 29. Comparación de la microdureza (HV) para cada electrodo, <b>prueba 5</b> .....	111
TABLA 30. Comparación de la microdureza (HV) para cada electrodo, <b>prueba 6</b> .....	112
TABLA 31. Medición de la dureza en la placa de acero AISI 1018 de la <b>prueba 2</b> hecha con electrodo de <b>Cobre electrolítico</b> .....	114
TABLA 32. Medición de la dureza en la placa de acero AISI 1018 de la <b>prueba 2</b> hecha con electrodo de <b>Grafito</b> .....	114

# Caracterización del proceso de EDM aplicado en acero AISI 1018

\*José Javier Cervantes Cabello, Arturo Barba Pingarrón., Magdalena Trujillo Barragán, Alfredo Aguilar Herrera, Alfonso Roberto Salazar Villanueva, José Luis Vázquez Pérez

\*Facultad de Ingeniería Universidad Anáhuac

Av. de las Torres 131, Col. Olivar de los Padres, C.P. 01780, México, D.F.

Tel. 56 –28-88-00, Fax 56-28-88-37,

Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

Circuito exterior de Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, México

Tel. 56 –22-80-50 Ext.125, Fax 56-22-80-55, [cercab@yahoo.com.mx](mailto:cercab@yahoo.com.mx)

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue el de establecer los mejores parámetros del proceso de electroerosión por penetración (Electrical Discharge Machining EDM), para obtener un mejor acabado superficial en una placa de acero AISI 1018, realizando comparaciones entre placas electroerosionadas por dos electrodos distintos: cobre electrolítico y grafito electrolítico. Se utilizaron diferentes parámetros para obtener diversos grados de acabados superficiales. A las placas obtenidas se les realizaron diferentes pruebas como la medición del tamaño del diámetro de la cavidad, tiempos de mecanizado, dureza y rugosidad en la superficie electroerosionada. Se concluye que un acabado superficial está directamente relacionado con los distintos parámetros que se programe en la maquina, de tal forma que al modificar un solo parámetro, los resultados son totalmente diferentes. Por ello la importancia de la correcta elección de los parámetros para obtener un buen trabajo en el proceso de electroerosión.

## ABSTRACT

The objective of this work was the establish the best parameters of the electroerosión process for penetration (Electrical Discharge Machining EDM) for to obtain better superficial finish in a steel plate AISI 1018, making comparisons between two different electrodes: electrolytic Cooper and electrolytic Graphite.

Different parameters were used to obtain diverse degrees of surperficial finishes. The obtained plates were made different tests like the diameter cavity size obtained, times of mechanized, hardness, rough to them in the surface.

We concludes that to obtain surface finish are relations with the differernt parameters wich the machine is programed and modify only when the parameters are differents. For it the importance of the correct election of the parameters to obtain a good work in the EDM process.

**Palabras clave:** electroerosión por penetración, gap(distancia entre electrodo y pieza de trabajo), fluido dieléctrico, acabado superficial, dureza superficial.

**Keywords:** Electrical Discharge Machining, electrodischarge by penetration, gap, dielectric fluid, surface finish, superficial hardness.

## NOMENCLATURA

I = Corriente de descarga, Amp

V = Voltaje de descarga, V

T = Tiempo de maquinado, min

TON = Tiempo de duración de la descarga,  $\mu$ s

TOFF = Pausa entre dos descargas consecutivas; %  
 Vw = Arranque de material, mm<sup>3</sup>/min  
 L<sub>INICIAL</sub> = Longitud inicial del electrodo, mm  
 L<sub>FINAL</sub> = longitud final del electrodo, mm  
 DT = Régimen de trabajo, %  
 D<sub>EXTERIOR</sub> = Dimensión del diámetro exterior de la cavidad, mm  
 D<sub>INTERIOR</sub> = Dimensión del diámetro interior de la cavidad, mm  
 Ra = Rugosidad de la superficie, μm  
 HV = Dureza Vickers, kg/mm<sup>2</sup>  
 HR = Dureza Rockwell kg/mm<sup>2</sup>  
 TS = Transistor estándar  
 TH = Transistor Hi-puls  
 Gap = Distancia entre electrodo y pieza de trabajo.

## I.- INTRODUCCIÓN

La electroerosión por penetración es un proceso de fabricación que consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza, hasta reproducir la forma del electrodo. La pieza de trabajo y el electrodo deben ser conductores, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material.

Durante el proceso de electroerosión, la pieza y el electrodo se sitúan muy próximos, dejando un espacio o distancia disruptiva (gap) que oscila entre 0,01 y 0,05 mm por el que circula un líquido dieléctrico. Al aplicar una diferencia de tensión continua y pulsante entre ambos, se crea un campo eléctrico intenso que provoca el paulatino aumento de la temperatura, hasta que el fluido dieléctrico se vaporiza. Al desaparecer el aislamiento del dieléctrico, salta la chispa, incrementándose la temperatura hasta los 20000°C, vaporizándose una pequeña cantidad de material de la pieza y el electrodo, formando una burbuja que hace de puente entre ambas. Al anularse el pulso de la fuente eléctrica, el puente se rompe separando las partículas del metal en forma gaseosa de la superficie original. Estos residuos, se solidifican al contacto con el dieléctrico y son finalmente arrastrados por la corriente junto con las partículas del electrodo. El ciclo completo se repite del orden de miles de veces por segundo.

El objetivo de este trabajo es el de establecer los parámetros idóneos para obtener el acabado superficial con las características que se requieren en un acero AISI 1018, así como determinar el material apropiado para el electrodo haciendo comparaciones de longitudes de desgaste y los tiempos de mecanizado.

Para poder determinar las condiciones y los parámetros óptimos de nuestro proceso, es necesario realizar comparaciones con respecto a las pruebas, empleando electrodos de Grafito y Cobre

electrolítico. Para esto se realizan a las probetas electroerosionadas pruebas de medición del tamaño de diámetros de la cavidad, tiempos de mecanizado, dureza, rugosidad en la superficie electroerosionada y macroscopía.

## II.- DESARROLLO

### Material y Equipo

Para el proceso de electroerosión se utilizó una máquina Agie Engemag EDM 440 NC. Se utilizó placas de acero AISI 1018 para las probetas, barras de cobre electrolítico de 1 pulgada de diámetro y barras de grafito electrolítico de 1 pulgada de diámetro para los electrodos. Además de la utilización de Portaelectrodos de acero AISI 1018 templado, fabricados por CNC. Se determinó el tipo de dureza en un Microdurómetro Leitz Wetzlar 8068, además de un durómetro Misawa Seiki Seisakusho. Se hicieron pruebas de rugosidad a la superficie electroerosionada con un rugosímetro electromecánico Mitutoyo, modelo SURFTEST – III y se determinó el tamaño del diámetro con un vernier Digital marca Mitutoyo. A las probetas se les practicó un análisis macroscópico a fin de determinar características de acabado y una posible zona afectada térmicamente por el proceso.

## III.- DISEÑO EXPERIMENTAL

### Corriente de descarga (I):

La corriente de descarga (I), determina la calidad y la productividad del proceso de erosión, está relacionada con las condiciones de operación existentes en el gap. Al comenzar con la erosión, las condiciones del gap se encuentran en un estado de constante transformación.

El fluido dieléctrico estabiliza las condiciones del gap, permitiendo el intercambio de calor y equilibrio térmico.

En este trabajo se hizo una selección de la corriente de descarga tomando en cuenta:

- Los diferentes acabados superficiales al variar los parámetros de entrada, ver Tabla 1 de programación de EDM.
- Características térmicas del electrodo.
- Condiciones del gap.
- Área de contacto entre electrodo y la pieza de trabajo (área frontal del electrodo).

La densidad de la corriente media estaría dada por:  
 $1TS = 3Amp$ ,  $1TH = 0.8Amp$

**Tiempo de mecanizado:**

El tiempo de mecanizado puede variar de acuerdo a los parámetros de entrada, se puede calcular a través de:

$$T = \frac{\text{area electrodo}(\text{mm}^2) \times \text{profundidad cavidad}(\text{mm})}{V_w(\text{arranque de material en mm}^3/\text{min})}$$

**Parámetros de entrada:**

Los parámetros de entrada a la máquina de electroerosión son: **TS, TH, TON, DT, Zmax, GAP y Sensibilidad.**

- **TS y TH:** El número de TS (transistor estandar) y TH (transistor hipuls) establece el nivel de energía de la descarga eléctrica.
- **Duración del pulso (TON):** Es el tiempo de duración de la descarga, se mide en microsegundos.
- **Régimen de trabajo – Duty Cycle (DT):** El régimen de trabajo (DT) es el porcentaje de TON con relación a la suma del tiempo de descarga (TON) y del tiempo de pausa (TOFF) de un trabajo de erosión. Cuanto más grande es el número del DT, más pequeño es el tiempo de pausa (TOFF) entre descargas.
- **Zmax:** Este parámetro permite ingresar la profundidad de la cavidad (en mm) que se permite al electrodo erosionar.
- **Control de regulación del GAP:** Se determina gap a la distancia que existe entre el electrodo y la pieza de trabajo. Al aplicar un gap pequeño aumenta el nivel de corriente media. Un gap muy pequeño generalmente resulta en un aumento en el desgaste del electrodo, causa inestabilidad en el sistema y aumenta la posibilidad de arcos destructivos. Se controla la regulación del gap por medio de la medición del voltaje del gap y flujo de la corriente media durante la erosión.
- **Control de regulación de la sensibilidad del servo.** Cuanto mas grande es el número en la escala de regulación, más alta es la sensibilidad del servo.

**III.1.- Procedimiento experimental**

Se obtuvieron electrodos de grafito y de cobre electrolítico de 2.54cm de diámetro. Se inicializa el proceso de electroerosión para obtener diferentes grados de rugosidad que se aproximen a un microacabado, basándonos en los patrones preestablecidos por el fabricante (ENGEMAQ). Para

cada tipo de prueba se hacen variar los parámetros de **TS, TH, TON,**

**DT y GAP,** manteniendo el nivel de Sensibilidad del servomotor tal y como lo sugiere el fabricante.

Para este trabajo, se menciona como **prueba** al proceso de electroerosión realizado en una placa cuadrada de acero AISI 1018 de dimensiones: ancho = 5cm, longitud = 30cm,

espesor = 0.5cm. Para cada prueba se generaron 5 cavidades, cada cavidad se realizo con diferentes parámetros de entrada, estos parámetros se muestran en la TABLA 1. A si mismo, se le denomina **evento** a la cavidad generada por el proceso de electroerosión por penetración.

TABLA 1. Programaciones de EDM, parámetros de entrada para el mecanizado

Prueba	TS	TH	TON	DT	GAP
1	0.5	0	20	35	5
2	1	0	50	55	5
3	2	0	100	55	5
4	3	0	150	60	5
5	4	0	200	65	5
6	6	0	300	75	5

**Tiempo de mecanizado y longitud desgastada del electrodo**

Los tiempos de mecanizado para cada prueba efectuada tienden a variar con respecto a los parámetros de entrada. Para cada prueba se midió la longitud inicial y final del electrodo para determinar el desgaste del electrodo que se produce durante el proceso de erosión. Los tiempos de mecanizado promedio, así como el desgaste promedio para cada prueba diferente en los dos tipos de electrodos, se muestran en el procesamiento de datos, ya que cada prueba genera 5 tablas y son 12 pruebas en total, por lo tanto sólo se mostrará la tendencia de los datos obtenidos así como su análisis de resultados por razones de espació.

**Diámetro de la superficie electroerosionada.**

En la gráficas 4 y 7 del procesamiento de datos se determinará las variación de las diferencias de los diámetros para cada una de las 6 pruebas con los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico, haciendo comparaciones con respecto al tiempo de mecanizado y con el desgaste en los electrodos. Cada prueba consta de 5 cavidades elaboradas a una profundidad de 2mm y con distintos parámetros de entrada, las cavidades presentan dos diferentes diámetros: uno interior y otro exterior, tal y como lo muestra la FIGURA 1, las medidas de los diámetros en cada

probeta se realizaron con un vernier digital marca Mitutoyo.

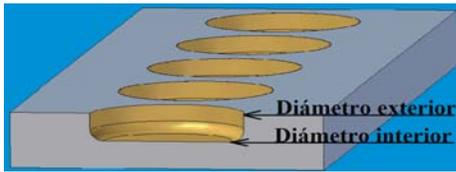


FIGURA 1. Cavidad obtenida después del proceso de electroerosión.

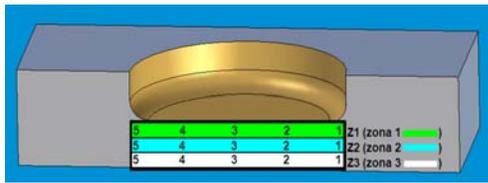


FIGURA 2. Zonas en la probeta sometidas a dureza Vickers

### Rugosidad

En la TABLA 2, se muestra la comparación de la rugosidad en la zona erosionada para cada tipo de electrodo, así como los parámetros especificados del rugosímetro como el rango y longitud de recorrido ( $\lambda$ ). Solo se presentan los resultados de la prueba 1

TABLA 2. Comparación de la rugosidad (Ra) después del proceso de electroerosión para cada tipo de electrodo, prueba 1.

Electrodo utilizado	Evento	Parámetros del rugosímetro	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )
Grafito	1	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	5.2
Cobre electrolítico	1	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	2.7
Grafito	2	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	3.0
Cobre electrolítico	2	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	3.0
Grafito	3	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	3.2
Cobre electrolítico	3	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	3.2
Grafito	4	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	2.6
Cobre electrolítico	4	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	3.0
Grafito	5	Ra = 20x0.8, $\lambda$ = 2.5	4.5
Cobre electrolítico	5	Ra = 50x5, $\lambda$ = 2.5	2.7

### Dureza Vickers

En la Tabla 3, se muestra la comparación de los valores obtenidos de la dureza Vickers en las probetas para cada tipo de electrodo (grafito y cobre electrolítico) utilizados durante el proceso de electroerosión, de igual forma solo se presentan los resultados de las prueba 1. Se realizaron 15 mediciones por prueba en un Microdurómetro marca LEITZ-WETZLAR.

La dureza Vickers por cada probeta se realiza en tres zonas diferentes, tales como lo muestra la FIGURA 2. Se realizan 5 pruebas por cada zona. La zona 1 es cercana a la cavidad electroerosionada, la zona 2 es la parte intermedia de espesor de la probeta y la zona 3 es la cercana a la superficie contraria a la cavidad electroerosionada.

Electrodo	Evento	Z <sub>1</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )	Z <sub>2</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )	Z <sub>3</sub> HV(kg/mm <sup>2</sup> )
Grafito	1	176	155	167
Cobre electrolítico	1	142	209	237
Grafito	2	270	209	188
Cobre electrolítico	2	197	201	224
Grafito	3	247	238	189
Cobre electrolítico	3	217	297	155
Grafito	4	206	164	193
Cobre electrolítico	4	258	264	232
Grafito	5	205	219	240
Cobre electrolítico	5	201	176	185

Tabla 3. Comparación de la microdureza (HV) para cada tipo de electrodo, prueba 1

### Dureza Rockwell

Asimismo se hicieron pruebas de dureza con un Durometro Rockwell, marca Misawa Seiki Seisakusho, escala: Rockwell B, carga de 100 kg, penetrador: de bola de 1/16" de diámetro. Para comprobar si el área electroerosionada cambió con respecto a las zonas que no se trabajó durante el proceso, Figura 3.

Siguiendo con el procedimiento se realizan las pruebas de dureza indentando cinco veces en sitios preestablecidos, obteniendo así los datos necesarios para establecer nuestro análisis, dichas zonas y su dirección están indicados en la Figura 3. Es necesario señalar que esto se hizo para las muestras obtenidas

con electrodo de cobre electrolítico y Grafito, sin embargo solo se mostrarán los resultados en el **procesamiento de datos** por razones de espacio.

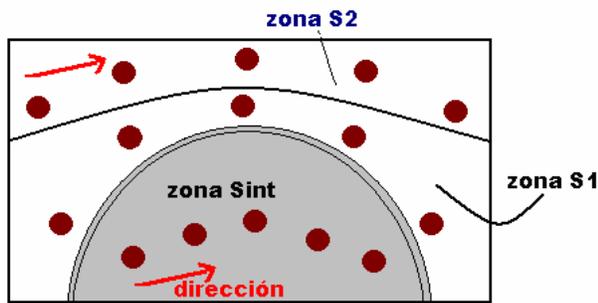
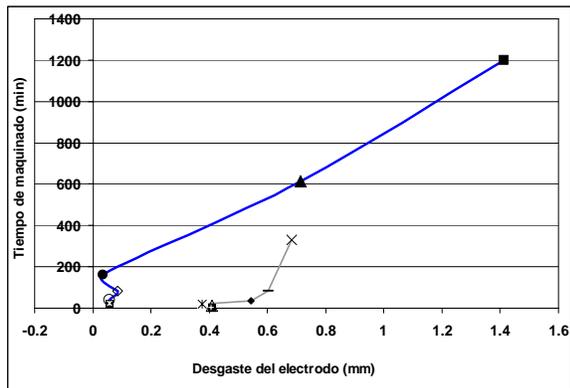


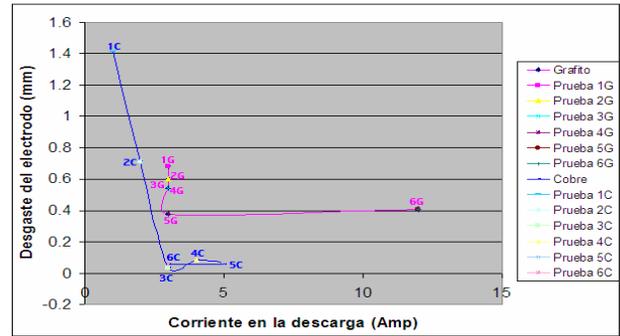
FIGURA 3. Ubicación de las indentaciones en las muestras.

### III.2 Procesamiento de datos

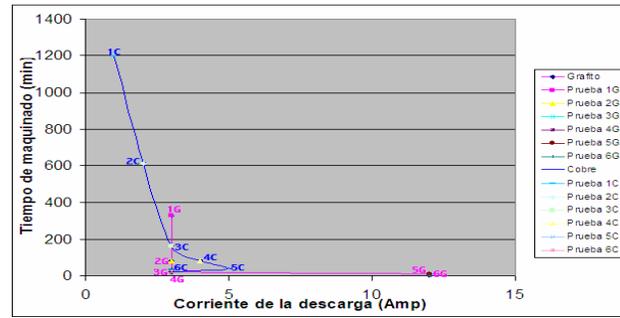
Al analizar los diversos resultados es necesario hacerlo por las diferentes formas en que se trabajó, es necesario empezar por la parte del mecanizado, la parte principal del estudio, para ello la información de las tablas presentadas y no presentadas, se desarrollaron en gráficas de las partes más representativas. A continuación se hace una comparación de los resultados promedios para cada prueba con respecto al Grafito y Cobre electrolítico.



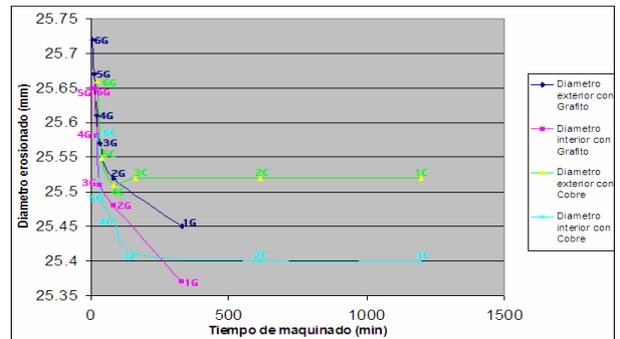
GRAFICA 1. Análisis comparativo para cada prueba promedio en el Tiempo de maquinado con respecto al desgaste del electrodo de Grafito y Cobre electrolítico



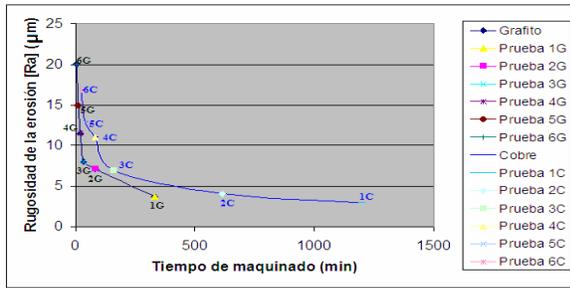
GRAFICA 2. Análisis comparativo para cada prueba promedio en el Desgaste del electrodo de Grafito y Cobre electrolítico con respecto a la Corriente de descarga.



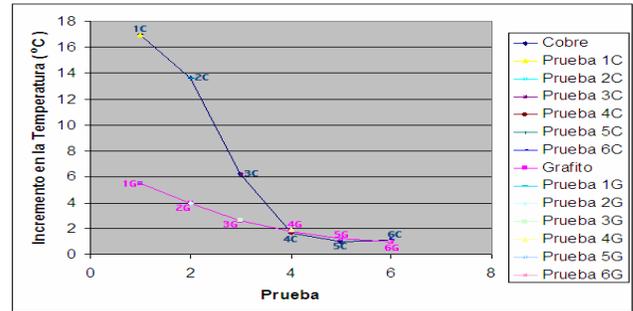
GRAFICA 3. Análisis comparativo del Tiempo de maquinado con respecto a la Corriente de descarga para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico



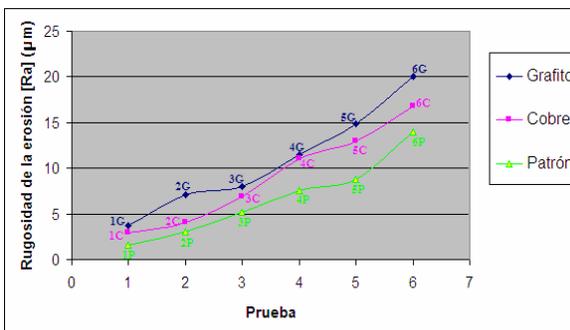
GRAFICA 4. Análisis comparativo de los Diámetros de la cavidad erosionada con respecto al Tiempo de maquinado para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.



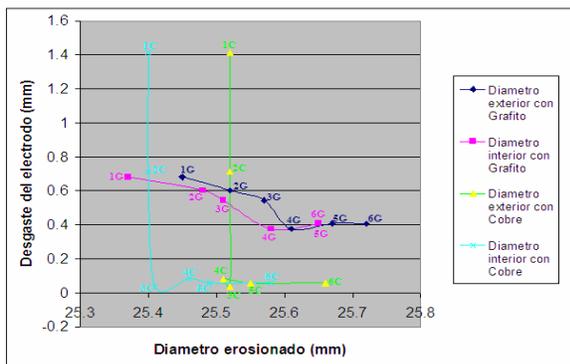
GRAFICA 5. Análisis comparativo de la Rugosidad promedio (Ra) de la cavidad erosionada con respecto al Tiempo de maquinado para los electrodos de Grafito y Cobre electrolítico.



GRAFICA 8. Análisis del Incremento de Temperatura del fluido dieléctrico para cada prueba con electrodo de Grafito y Cobre electrolítico.



GRAFICA 6. Análisis comparativo de la Rugosidad promedio (Ra) de la cavidad erosionada para los electrodos de Grafito electrolítico, Cobre electrolítico y de la muestra patrón del fabricante trabajada con electrodo de Cobre electrolítico para cada tipo de prueba.



GRAFICA 7. Análisis comparativo en el Desgaste de los electrodos de Grafito electrolítico y Cobre electrolítico con respecto a los Diámetros de la cavidad erosionada.

### III.3 Macroscopía.

Para hacer una evaluación de la zona trabajada y de los posibles cambios sufridos por la temperatura y las descargas, se hizo una serie de análisis macroscópicos. Estas tomas se obtuvieron en un Fotomacroscopio marca Wild Heerbrugg, modelo M400 auxiliado por un Fotoautomático Wild modelo MPS 55, a un aumento de 320X. Por razones de espacio solo se presenta la muestra 5 para el Cobre electrolítico y Grafito.

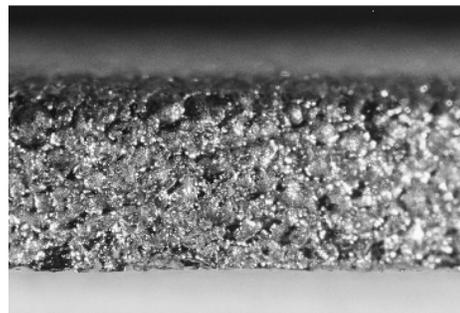


FIGURA 4. Macroscopía del costado erosionado de la muestra 5 de Cobre

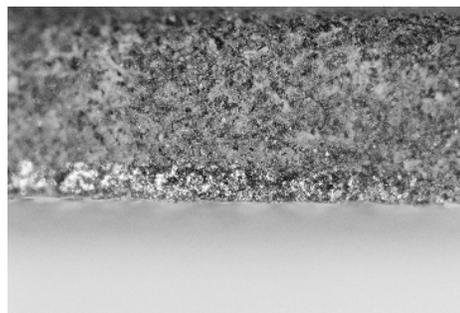


FIGURA5. Macroscopía del costado erosionado, muestra 5 de Grafito.

## IV. ANALISIS

### IV.1 Análisis por gráfica.

**GRAFICA 1.** Para un mayor tiempo de maquinado el electrodo de Cobre electrolítico se desgasta longitudinalmente más que el electrodo de Grafito, si el tiempo de maquinado disminuye se conserva la tendencia hasta cuando se realiza un erosión por debajo de los 35min (Prueba 3G), ya que por debajo de este tiempo el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico. El desgaste en los electrodos es superior a los 83min de erosión (Prueba 3G).

**GRAFICA 2.** Para una corriente de descarga menor a los 3Amp (Prueba 3G) el electrodo que se desgasta más longitudinalmente es el de Cobre electrolítico, sin embargo para una corriente de descarga superior a los 4Amp (Prueba 4G), el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico. Además, para poder realizar la Prueba 6 bajo las mismos parámetros para los dos electrodos (TS = 6, TH = 0, TON = 300, DT = 75, GAP = 5), requerimos para el electrodo de Grafito de una corriente mayor y un tiempo de maquinado menor a comparación del electrodo de Cobre electrolítico.

**GRAFICA 3.** Se requiere de una corriente de descarga mayor al trabajarse con electrodos de Grafito que cuando se trabaja con electrodos de Cobre electrolítico, sin embargo el Tiempo de maquinado disminuye al trabajar con electrodos de Grafito.

**GRAFICA 4.** El resultado que se obtiene de la cavidad erosionada son dos diámetros diferentes; un diámetro exterior mayor a un diámetro interior. Este fenómeno es poco perceptible cuando se realiza un tiempo de maquinado relativamente bajo. Sin embargo, para los dos tipos de electrodos, se observa que para mayores tiempos de maquinado se presenta una conicidad mayor. Para el Cobre electrolítico la conicidad es mucho mayor que en el caso del Grafito, sin embargo, esta conicidad presenta un diámetro interior casi constante después de los 162min de maquinado (Prueba 3C para los dos tipos de diámetros), por lo que el ángulo en la conicidad podría mantenerse constante. Al trabajar con electrodos de Grafito, se presenta el mismo fenómeno de conicidad, sin embargo al ir aumentando el tiempo de maquinado el diámetro interior va disminuyendo con respecto al diámetro exterior (Prueba 4G para los dos tipos de diámetros). Por lo que se puede considerar que el ángulo en la conicidad va cambiando al ir aumentando el tiempo.

**GRAFICA 5.** Para cualquier tiempo de maquinado, se obtiene un mejor acabado superficial al trabajarse con electrodos de Cobre electrolítico, ya que se obtiene una mejor rugosidad, es decir, la rugosidad con electrodos de Cobre electrolítico es menor que con electrodos de Grafito. Sin embargo los tiempos de maquinado son mayores que cuando se trabajan con electrodos de Grafito.

**GRAFICA 6.** Al hacer una comparación de rugosidades de los dos tipos de electrodos con respecto a la muestra patrón del fabricante, se determina que el mejor acabado superficial nos lo proporciona el electrodo de Cobre electrolítico, acercándose al patrón establecido y siendo menores los valores de rugosidad con respecto al Grafito en cada prueba realizada.

**GRAFICA 7.** Para un tiempo de maquinado superior a los 614min (Prueba 2C) se presenta un mayor desgaste en electrodos de Cobre electrolítico que con electrodos de Grafito, sin embargo el desgaste que presenta el Cobre electrolítico es menor al trabajarse por debajo de 162min (Prueba 3C). La conicidad en los dos tipos de electrodos se hace más frecuente hasta la prueba 4(Prueba 4G y Prueba 4C), estando relacionada directamente con el desgaste de los electrodos. Cuando el diámetro interior es menor al diámetro exterior de la cavidad, existe un mayor desgaste en los electrodos, sin embargo al disminuirse el diámetro interior y aproximarse al diámetro exterior (Pruebas 5C, 6C, 5G y 6G), el desgaste longitudinal tiende a estabilizarse de forma constante para los dos tipos de electrodos.

**GRAFICA 8.** Existe un mayor incremento en la temperatura en el fluido dieléctrico cuando se trabaja con electrodos de Cobre electrolítico que con respecto al Grafito. Estos incrementos de temperatura son considerables al trabajarse con tiempos superiores a 83min (Prueba 4C) con electrodos de Cobre electrolítico. Al trabajar con electrodos de Grafito con tiempos superiores a 22min (Prueba 4G), los incrementos de temperatura en el fluido dieléctrico tienden a aumentar.

### IV.2 Analisis de Dureza.

Para ambos electrodos, no hay una repetición de dureza en toda la zona; es mayor en la zona afectada por el trabajo de electroerosión que en la zona donde no se trabajó, este patrón se repite la mayoría de las veces para ambos casos, además, la dureza para el

caso del electrodo de Grafito es mayor que en el de Cobre electrolítico. Para la dureza Rockwell, los valores son similares entre los casos de los dos tipos de electrodos, las variaciones entre cada zona son muy bajas y repetitivas.

#### **IV.3 Analisis de Macroscopía.**

En las zonas cercanas al área de trabajo no se afectan térmicamente, el electrodo de grafito define más la cavidad de la electroerosión. Macroscópicamente los acabados de la probeta de Cobre electrolítico están mas definidos, sin embargo el acabado es mas burdo que a comparación del electrodo de Grafito.

#### **V. CONCLUSIONES**

En este trabajo se analizó el proceso de electroerosión por penetración en acero AISI 1018 con electrodos de Grafito y de Cobre electrolítico. Las pruebas realizadas a las muestras obtenidas mediante el proceso, nos presentan importantes conclusiones.

##### **Al trabajar con electrodos de Cobre electrolítico:**

- Por debajo de los 35min el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico
- Para una corriente de descarga menor a los 3Amp el electrodo que se desgasta más longitudinalmente es el de Cobre electrolítico
- Se requiere de una corriente de descarga menor a 4Amp al trabajarse con electrodos de Cobre electrolítico que con electrodos de Grafito
- Para el Cobre electrolítico la conicidad es mucho mayor que en el caso del Grafito, sin embargo, esta conicidad presenta un diámetro interior casi constante después de los 162min de maquinado, por lo que el ángulo en la conicidad podría mantenerse constante.
- Para cualquier tiempo de maquinado, se obtiene un mejor acabado superficial al trabajarse con electrodos de Cobre electrolítico ya que se obtiene una mejor rugosidad, es decir, la rugosidad con electrodos de Cobre electrolítico es menor que con electrodos de Grafito. Al hacer una comparación de rugosidades de los dos tipos de electrodos con respecto a la muestra patrón del fabricante, se determina que el mejor acabado superficial nos lo proporciona el electrodo de Cobre electrolítico, acercándose al patrón establecido y siendo menores los valores

de rugosidad con respecto al Grafito en cada prueba realizada.

- Existe un mayor incremento en la temperatura en el fluido dieléctrico cuando se trabaja con electrodos de Cobre electrolítico que con Grafito.

##### **Al trabajar con electrodos de Grafito:**

- Para un mayor tiempo de maquinado el electrodo de Cobre electrolítico se desgasta longitudinalmente más que el electrodo de Grafito, ya que, el Grafito tiene un mayor punto de fusión con respecto al del Cobre electrolítico. Si el tiempo de maquinado disminuye se conserva la tendencia hasta por debajo de los 35min.
- Para una corriente de descarga superior a los 4Amp, el electrodo de Grafito se desgasta más que el de Cobre electrolítico
- El Tiempo de maquinado disminuye al trabajar con electrodos de Grafito.
- Al trabajar con electrodos de Grafito, se presenta el mismo fenómeno de conicidad, sin embargo al ir aumentando el tiempo de maquinado el diámetro interior va disminuyendo con respecto al diámetro exterior. Por lo que se puede considerar que el ángulo en la conicidad va cambiando al ir aumentando el tiempo.
- Los tiempos de maquinado son menores al trabajarse con electrodos de Grafito.

El resultado que se obtiene de la cavidad erosionada son dos diámetros diferentes; un diámetro exterior mayor aun diámetro interior. Este fenómeno es poco perceptible cuando se realiza un tiempo de maquinado relativamente bajo. Sin embargo, para los dos tipos de electrodos, se observa que para mayores tiempos de maquinado se presenta una conicidad mayor. Cuando el diámetro interior es menor al diámetro exterior de la cavidad, existe un mayor desgaste en los electrodos, sin embargo al disminuirse el diámetro interior y aproximarse al diámetro exterior, el desgaste longitudinal tiende a estabilizarse de forma constante para los dos tipos de electrodos. La elección de los parámetros nos proporcionará un mejor acabado superficial con un adecuado tiempo de maquinado, una rugosidad deseable, diferencias menores en cuanto a la repetibilidad de dimensiones y con una alteración mínima en sus propiedades y características. Las zonas cercanas al área de electroerosión no son afectadas térmicamente, aun con los parámetros de

mayor descarga eléctrica. . Así sucede también con la dureza, en donde se endurece mínimamente la zona de trabajo, sin alterar sus propiedades mecánicas.

## **VI. BIBLIOGRAFIA**

1. Advanced Methods of Machining, J. A. Machining, Editorial Chapman and Hall, 1988
2. Manufactura Ingeniería y tecnología, Serope Kalpakjian and Steven R. Schmind, 2001
3. Principios de Ingeniería de Manufactura, Stewart C. Black, Vick Chiles, A. J. Lissaman, S. J. Martin, Compañía Editorial Continental



**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

# LABORATORIO DE PROCESOS DE CORTE DE MATERIALES



## PRACTICA 8: PROCESO DE ELECTROEROSION

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL



## OBJETIVO

1.- Obtener dos tipos de acabados superficiales mediante el proceso de electroerosión y determinar el desgaste que existe en el electrodo y sus características finales.

## MATERIAL Y EQUIPO

- Máquina de electroerosión EDM 440-NC (ENGEMAC)
- Portaelectrodo
- Electrodo de Grafito electrolítico
- Placa de acero 1018
- Calibrador Vernier
- Cronómetro



## INTRODUCCIÓN

*Lectura previa para la operación del equipo de electroerosión*

### ESTRUCTURA DEL EQUIPO UTILIZADO EN LA ELABORACIÓN DE PRUEBAS.

Los componentes correspondientes a la máquina de electroerosión por penetración son variados, desde el panel de control, el controlador o las zonas de trabajo. Para un mejor conocimiento de la máquina se da a continuación una breve explicación de las partes más importantes que conforman el equipo.

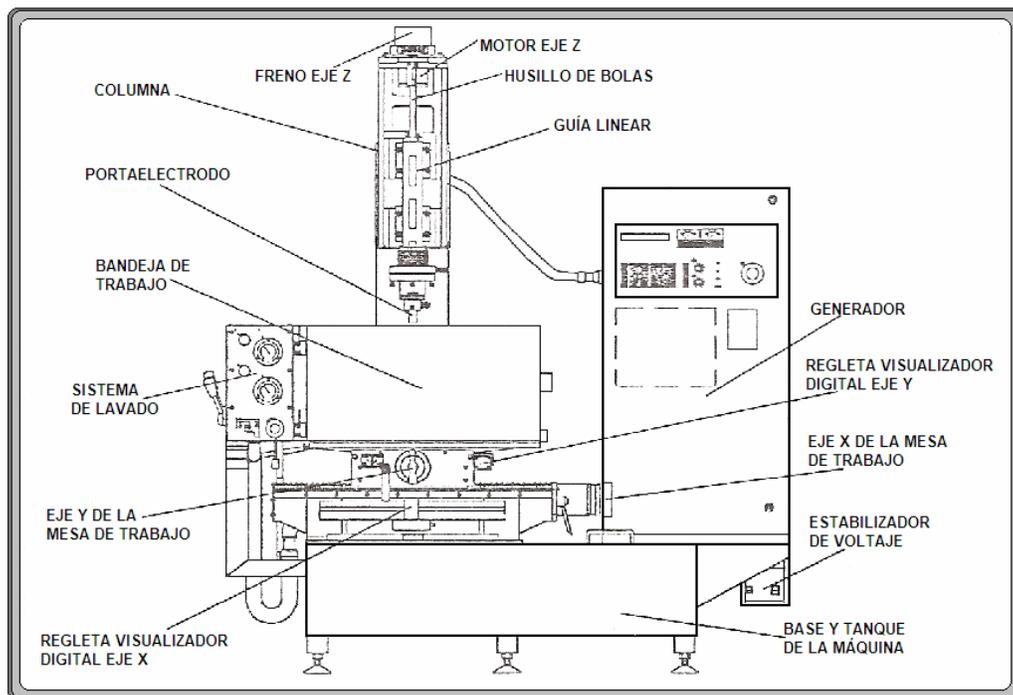


FIGURA 1. Esquema frontal de los componentes más representativos de la Máquina de electroerosión Agie Engemaq EDM 440 NC.

#### **Bandeja de trabajo**

La máquina de electroerosión Engemaq tiene una bandeja de trabajo que contiene al fluido dieléctrico. Esta bandeja de trabajo contiene una compuerta de drenaje además de un canalón debajo de la puerta de la bandeja, al cual recoge el goteo de posibles infiltraciones en la puerta de la bandeja y lo lleva de regreso al tanque dieléctrico. La FIGURA 41 nos presenta los elementos que contiene la bandeja de trabajo.

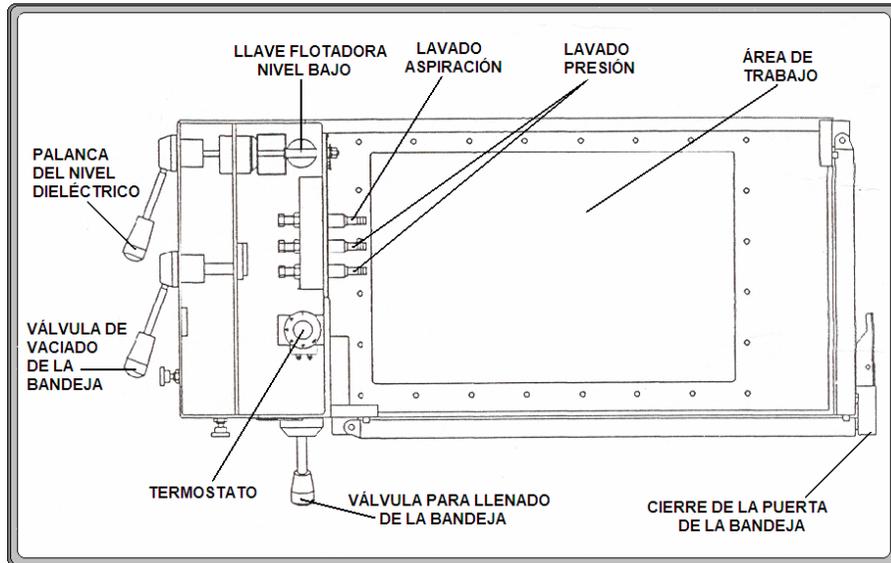


FIGURA 2. Bandeja de trabajo

### DETECTORES DE TEMPERATURA Y NIVEL DIELECTRICO

La llave flotadora equipada con el detector de nivel y el detector de temperatura están instalados adentro del subconjunto de drenaje de la bandeja de trabajo.

El operador debe ajustar el nivel de dieléctrico por medio de la palanca de control de nivel. El nivel de dieléctrico debe mantenerse por lo mínimo 40 mm arriba de la zona de chispa entre el electrodo y la pieza.

La zona de erosión debe estar sumergida por lo mínimo 40 mm abajo del dieléctrico. Si el nivel de dieléctrico baja del nivel preajustado; la erosión se apaga y el mensaje “NIVEL” aparece en la pantalla.

Si la temperatura del dieléctrico es muy elevada ( $> 50^{\circ}\text{C}$ ); la erosión se apaga y el mensaje “ALTA TEMPERATURA” aparece en la pantalla.

### DESBORDAMIENTO DE LA BANDEJA DE TRABAJO

La máquina de electroerosión Engemaq tiene una compuerta de drenaje adentro de la bandeja para desbordamiento del dieléctrico. Haga una prueba funcional de desbordamiento antes de empezar cada trabajo de erosión.

### SISTEMA ANTICOLISIÓN DEL ELECTRODO

Este sistema tiene la función de proteger al electrodo y la pieza en el caso de una colisión entre electrodo, pieza, los elementos de sujeción o cualquier cosa sobre la mesa que sea conductora de electricidad y en consecuencia de eso tiene conexión eléctrica con la mesa.

Este sistema de protección de colisión se encuentra activo en los movimientos manuales y automáticos. El operador puede desactivar la protección de colisión con la tecla anticolisión de electrodo en el teclado del panel del generador. Esta tecla es útil cuando el operador utiliza un reloj comparador con base magnética en las tareas de alineación del electrodo o de la pieza.



**Siempre que sea posible, usted debe hacer los movimientos del eje Z con la protección del electrodo activado.**

**¡ ADVERTENCIA ¡**

Nunca ponga las manos dentro de la bandeja de trabajo durante los movimientos automáticos del eje Z. En caso de peligro detenga el movimiento del eje Z, apretando la llave de emergencia en el panel del generador.

**“NUNCA OPERE LA MÁQUINA SIN LA PRESENCIA DEL PERSONAL AUTORIZADO”**

- No mecanice materiales peligrosos sin la presencia del operador ( ciertas aleaciones de aluminio causan reacciones químicas en el dieléctrico durante la erosión lo que resulta en un aumento de riesgo de fuego )
- Al afirmar la pieza de trabajo sobre la mesa de coordenadas, asegúrese que nada va a impedir el movimiento del flujo del dieléctrico dentro de la bandeja de trabajo.
- Antes de empezar la operación de mecanizado, revise si la circulación del dieléctrico es adecuada para una efectiva disipación de calor creado durante la erosión.
- Mantenga un extintor de incendios disponible muy cerca del equipo de electroerosión. El CO<sub>2</sub> es el agente recomendado. Los agentes de polvo y espuma no son apropiados.

**FLUIDO DIELECTRICO**

Tradicionalmente se utiliza en este proceso un aceite a base de hidrocarburo EDM. Es un dieléctrico fabricado de acuerdo con las rígidas especificaciones de calidad. El overcut en EDM es imprevisible cuando se usa el fluido dieléctrico errado.

El fluido dieléctrico tiene tres funciones básicas:

- Forma una barrera aislante entre el electrodo y la pieza de trabajo. Para la producción de la chispa, el generador de potencia suministra un alto voltaje que rompe la barrera aislante e inicia el proceso de electroerosión.
- Produce el enfriamiento de pieza de trabajo así como del electrodo.
- Efectúa el barrido de las partículas erosionadas hacia fuera del GAP.

**COMBUSTIÓN DEL DIELECTRICO**

Un sello de peligro pegado en la máquina advierte que la temperatura del dieléctrico no debe exceder a los 50° C.

Los dieléctricos con un punto de combustión mayor > 100°C son más adecuados para altas corrientes de descargas.



### INDICADOR DEL NIVEL DEL DIELECTRICO

El tanque del dieléctrico esta equipado con un indicador de nivel. Revise periódicamente el nivel del dieléctrico, llenándolo cuando la varilla flotadora alcanza la raya amarilla.

### PORTAELECTRODO

Las máquinas de electro erosión son equipadas con un portaelectrodo de alta precisión con funciones de ajuste de inclinación lateral en las dos direcciones (XY) y ajuste giratorio (eje manual C)

### ENCENDIDO DEL GENERADOR

El operador puede encender el generador, activando la palanca del disyuntor principal F1 ubicado en la puerta trasera y la llave pulsadora de emergencia (SI) en el panel del generador.

La pantalla en el panel del generador se enciende y luego aparece el siguiente mensaje:

### Firmware

Después del mensaje, la máquina está lista para la programación y proceso de erosión.

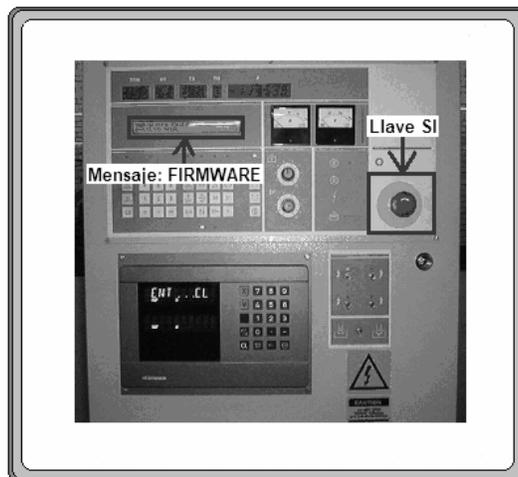


FIGURA 3. Panel de control y generador.

### ALINEACION DE LA PIEZA DE TRABAJO Y EL ELECTRODO

El montaje y alineación de la pieza de trabajo y del electrodo en su posición exacta es una de las tareas más importantes en un proceso de mecanizado por electroerosión.

El operador debe sujetar la pieza de trabajo sobre la mesa de trabajo de acuerdo a las características del material a trabajar.

*Nota: Es muy importante que la conductividad eléctrica entre la pieza de trabajo y la mesa de trabajo sea buena. Por eso es recomendable limpiar la mesa de trabajo antes de apoyar sobre ésta la pieza de trabajo, evitando así una mala conductividad y su desplazamiento durante el proceso de erosión.*



### MOVIMIENTO DE LA MESA DE COORDENADAS

La mesa de coordenadas puede ser desplazada por medio de los volantes de los ejes X e Y. La distancia del desplazamiento de los ejes X e Y puede ser medido con un visualizador digital o directamente en la escala de los aros del volante.

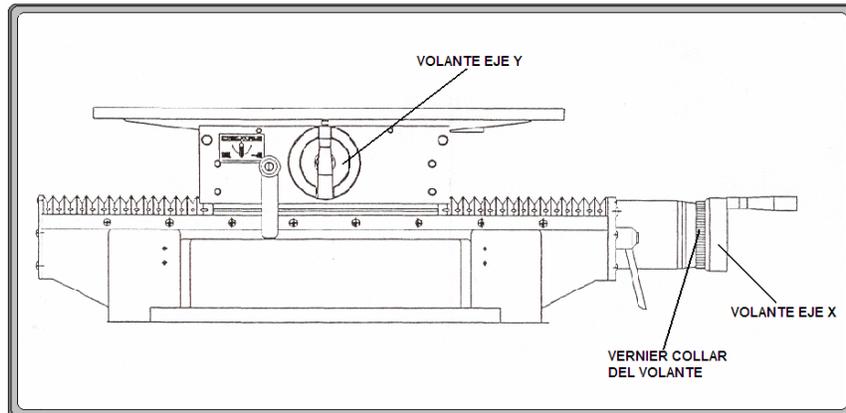


FIGURA 4. Esquema de la mesa de coordenadas. Vista lateral

### SISTEMA DE FRENO DE LA MESA DE COORDENADAS

Es recomendable frenar los ejes X e Y de la mesa de coordenadas antes de empezar el trabajo de erosión. El freno evita el desplazamiento de la mesa de coordenadas durante el proceso de erosión.

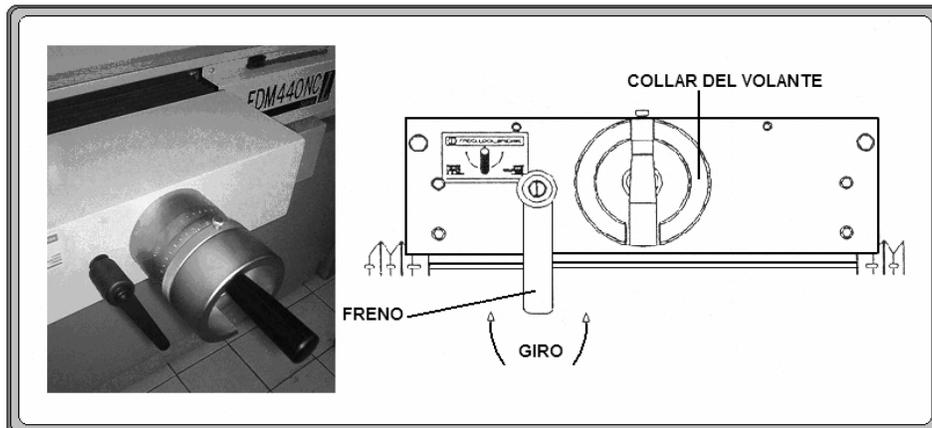


FIGURA 5. Volante del eje Y y freno manual. Vista frontal

### LLAVE SELECTORA DE POLARIDAD

La llave selectora de polaridad (figura de abajo) se usa para invertir la polaridad del electrodo. En trabajos normales de erosión, la polaridad del electrodo es positiva y corresponde a la posición 1 de la llave selectora. En algunos trabajos al usar electrodo de grafito o cuando el electrodo es montado en la mesa de trabajo; el operador de la máquina debe cambiar la polaridad del electrodo.



*Nota:* Una llave magnética reemplaza la llave selectora manual en los generadores de 80 y 120 Amperios. La llave magnética es activada por medio de una palanca ubicada en el panel del generador.

### PANEL DE MANDOS DEL GENERADOR

La siguiente figura muestra el panel de control del generador con sus componentes principales

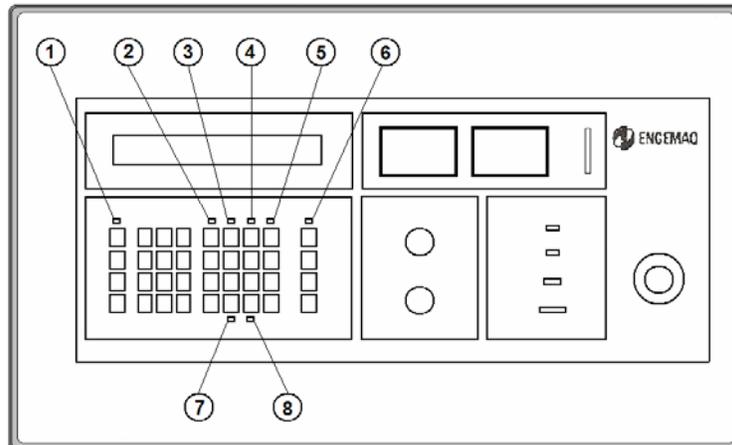


FIGURA 6. Diodos de señalización del panel del generador: 1) Señalización del OFF FEED, 2) Señalización del sistema de anticollisión, 3) Señalización de la fuente de potencia de erosión, 4) Señalización de la llave flotadora inferior del nivel dieléctrico, 5) Señalización de la bomba del dieléctrico, 6) Señalización del modo de operación, 7) Señalización del sistema de erosión intermitente, 8) Señalización del lavado intermitente

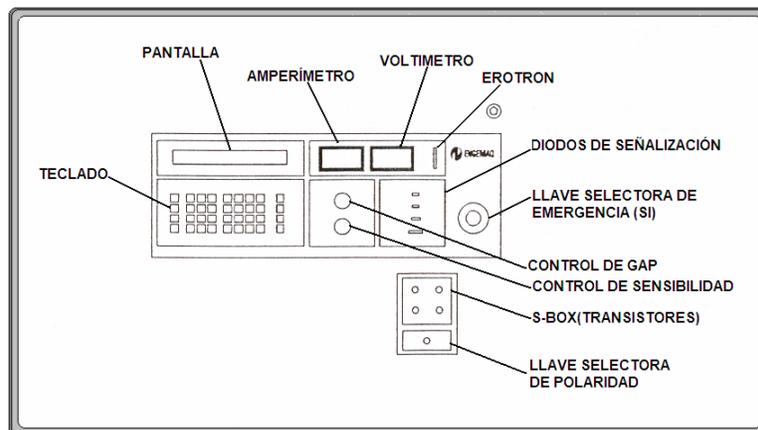


FIGURA 7. Esquema representativo del Panel de control y generador.

### PANTALLA ALFANUMÉRICA



La pantalla permita al operador examinar la edición de un programa, analizar o seleccionar programas de erosión almacenados en la memoria y saber las causas de las fallas de la máquina.

#### **LLAVE PULSADORA DE EMERGENCIA**

La llave pulsadora de emergencia (llave SI, Fig. 4), se usa para desconectar totalmente la energía eléctrica del generador en un caso de emergencia. También se utiliza para encender y apagar la máquina.

- **Encender:** Girar la llave pulsadora en sentido horario.
- **Apagar:** Apretar la llave pulsadora.

#### **VOLTÍMETRO**

El voltímetro mide el voltaje del GAP (voltaje entre electrodo y pieza). Por medio del voltímetro el operador puede controlar visualmente el ajuste del GAP.

#### **AMPERÍMETRO**

El amperímetro mide el flujo de corriente media durante la erosión, permitiendo al operador controlar el ajuste del nivel de corriente de acuerdo con los valores tomados de las tablas de erosión.

#### **CONTROLES DE REGULACIÓN DE EROSIÓN**

##### **Control de regulación del GAP:**

Este control regula la distancia vertical entre el electrodo y la pieza (gap). Un gap mas pequeño aumenta el nivel de corriente media. Un gap muy pequeño generalmente resulta en un aumento en el desgaste del electrodo, causa inestabilidad en el sistema y aumenta la posibilidad de arcos destructivos. El operador controla la regulación del gap por medio de la medición del voltaje del gap y flujo de la corriente media durante la erosión.

*Nota:* El control del gap no funciona cuando el “Modo de operación automático” esta accionado.

##### **Control de regulación de la sensibilidad del servo.**

Este control regula el nivel de sensibilidad o respuesta del sistema servo. Cuanto mas grande es el número en la escala de regulación, más alta es la sensibilidad del servo.

#### **DIODOS DE SEÑALIZACIÓN DE LA FUENTE DE EROSIÓN**

Los diodos luminosos de la fuente de erosión están ubicados en el frente del panel del generador.

##### **Señalización sistema de potencia estándar**

Cuando este diodo luminoso esta encendido, indica que el sistema de potencia estándar (100 V) está accionado, esto es, está en uso la corriente de los transistores TS.

##### **Señalización sistema de potencia estándar HiPuls**

Cuando este diodo luminoso está encendido, indica que el sistema de potencia hipuls (250 V) está accionado, esto es, está en uso la corriente de los transistores TH.



**Señalización de erosión encendida**

Cuando este diodo está encendido, alerta al operador sobre el peligro de alto voltaje que existe entre electrodo y pieza de trabajo.

**Señalización alineación del electrodo/pieza**

Este diodo luminoso en conjunto con la alarma sonora es usado en las tareas de alineación del electrodo y o la pieza de trabajo. El diodo se enciende y la alarma suena cuando el electrodo toca la pieza.

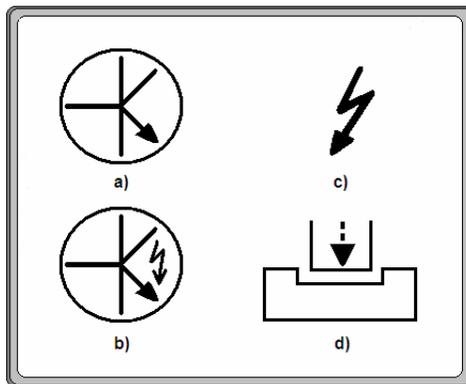


FIGURA 8. Diodos de señalización de la fuente de erosión; a) sistema de potencia Standard, b) sistema de potencia Hi puls, c) erosión encendida, d) alineación del electrodo-pieza.

**Teclado.** Permite al operador editar los parámetros básicos (TON-DT-TS-TH) y las funciones auxiliares de un trabajo de mecanizado por electroerosión, FIGURA 3

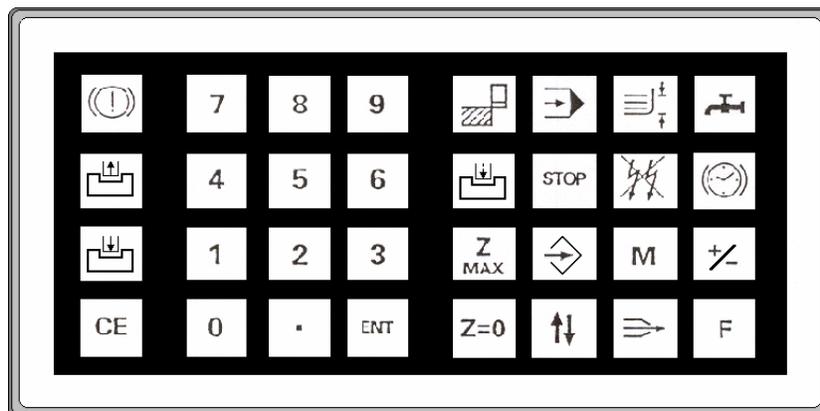


FIGURA 9. Teclado de operación.

**TECLAS DE COMANDO**

**Subir electrodo:** Esta tecla hace que el eje Z suba rápidamente (375mm/min.)

*Nota:* Cuando el sistema anticolidión del electrodo esta accionado (Led amarillo encendido), la velocidad máxima del eje Z es de 100mm/min.



**Bajar electrodo:** Esta tecla hace que el eje Z baje rápidamente. La velocidad máxima del eje Z también es limitada a 100mm/min. Cuando el sistema anticolidión del electrodo está accionado.

**Cancelar:** Esta tecla apaga un dato numérico que fue introducido por error.

**Alfanuméricas y punto decimal:** Estas teclas permiten al operador introducir los datos de los parámetros para el mecanizado.

**Ent:** Acepta el número mostrado en la pantalla. El operador debe teclear ENT siempre que desee confirmar un dato numérico.

**Sistema anticolidión del electrodo:** Esta tecla permite desactivar el sistema anticolidión del electrodo. Cuando el diodo amarillo no está encendido, indica que el sistema anticolidión está desactivado. En esta condición el operador debe tener cuidado al usar la teclas de subir y bajar electrodo, no permitiendo que el electrodo choque con la pieza.

**Centrado:** Cuando se acciona la tecla centrado, el eje Z comienza a bajar lentamente y se detiene cuando el electrodo toca la pieza de trabajo, emitiendo una señal sonora. Se usa para hacer la alineación del electrodo o pieza y para poner a cero el sistema de medición del eje Z. El operador también debe presionar la tecla centrado en la programación del “Modo destino” para desplazar al eje Z a una posición designada hacia abajo o arriba del punto de referencia cero del eje Z.

*Nota: El operador también puede detener el movimiento del eje Z, apretando la tecla off feed, mientras que el eje Z va bajando o subiendo. El mando off feed bloquea el eje Z y una señal sonora se escucha cuando el electrodo toca en la pieza de trabajo, permitiendo al operador efectuar trabajos de alineación en la pieza y o poner a cero los ejes X, Y del visualizador digital.*

## DESARROLLO:

### Paso 1

**Encendido del generador:** activando la palanca del disyuntor principal F1 ubicado en la puerta trasera y la llave pulsadora de emergencia (SI) en el panel del generador.

La pantalla en el panel del generador se enciende y luego aparece el siguiente mensaje:

### Paso 2

**Montar el electrodo** (unión electrodo con porta electrodo)

### Paso 3

Verificar la uniformidad de la superficie del portaelectrodo, Por medio de un palpador de carátula



**Paso 4**

**Realizar la medición de la longitud inicial del electrodo**

**Paso 5**

**Montar la pieza de trabajo sobre la mesa:** se realiza la sujeción de la pieza de trabajo a la mesa, abriendo y cerrando el imán anexo a la mesa de trabajo.

**Paso 6**

**Realizar el centrado de la pieza** de trabajo para los tres ejes (X, Y)

**Paso 7**

**Realizar el centrado en el eje Z:** El eje Z se detiene cuando el electrodo toca en la pieza de trabajo, permitiendo al operador colocar en cero el sistema de medición del eje Z.

**Paso 8**

**Programar la Z0,** como la superficie de la pieza de trabajo.

**Paso 9**

**Ingresar los parámetros de la rugosidad deseada** (ver Tabla de programación):  
Se colocan los valores de las variables Z máx., TON, TS, TH y DT.

**Paso 10**

**Revisar los niveles y las palancas del drenado del fluido dieléctrico.**

**Paso 10**

**Iniciar el proceso:** por medio de la tecla “ENCENDIDO DE EROSIÓN”

**Paso 11**

**Toma de datos:**

**Antes del proceso.**

- 1.- Registro de longitud inicial del electrodo
- 2.- Verificación de la profundidad deseada  $Z_{máx}$ , tiempos, longitud final del electrodo
- 3.- Verificación de la Z0.

**Al iniciar el proceso:**

- 1.- Iniciar el tiempo de proceso en cuanto el electrodo y la pieza tengan el primer contacto.

**Al finalizar el proceso:**

- 1.- Parar el tiempo cronometrado
- 2.- Medir la longitud final del electrodo
- 3- Verificar por medio del vernier la  $Z_{máx}$ .
- 4.- Medir la rugosidad obtenida con un rugosímetro



### Paso 12

Repetir el procedimiento para la siguiente erosión, cambiando los datos de entrada según el profesor.

*Nota:* Se debe realizar el proceso para una rugosidad con 2mm de profundidad ( $Z_{máx}$ ).

### Tabla de programación.

Tipo de Prueba	TS	TH	TON	DT	GAP
1	0.5	0	20	35	5
2	1	0	50	55	5
3	2	0	100	55	5
4	3	0	150	60	5
5	4	0	200	65	5
6	6	0	300	75	5

TABLA 1. Programaciones de la máquina EDM, parámetros de entrada para el mecanizado.

## RESULTADOS:

1. Obtener de los resultados obtenidos las graficas comparativas de los dos procesos.
2. Desgaste vs Tiempo
3. Rugosidad vs Desgaste (altura inicial y altura final)
4. Rugosidad vs Tiempo.
5. Verificar los resultados en las tablas de la Tesis: “Determinación y Optimización de parámetros del proceso de electroerosión en acero AISI 1018”, Aguilar, Alfredo; Salazar, Alfonso, 2007

## CONCLUSIONES:

### Analice, explique y compruebe:

1. ¿Qué proceso resulta más eficiente?
2. ¿Con que programación se obtienen mejores acabados y por qué?
3. ¿Qué programación se usaría si se requiere un acabado ultrafino?
4. ¿Existe una relación entre la programación y los resultados?



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---



5. ¿Existe una relación lineal en cuanto a los parámetros de entrada y los resultados obtenidos?
6. Mencione las ventajas y desventajas de este proceso respecto a los demás procesos de maquinado.